

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Frézování tvarových ploch s ohledem na přesnost

**Proposal of Machining Strategy of Free Form Surface Milling to
Increasing Accuracy**

Student:

Bc. Jakub Minarčík

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Minarčík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Frézování tvarových ploch s ohledem na přesnost**
Proposal of Machining Strategy of Free Form Surface Milling to
Increasing Accuracy

Zásady pro vypracování:

1. Přehled strategií při frézování tvarových ploch.
2. Zhodnocení a rozbor obráběných ploch zadané součásti.
3. Aplikace navrhovaných strategií se zaměřením na přesnost výroby.
4. Zhodnocení a rozbor dosažených výsledků návrhu.
5. Závěr pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

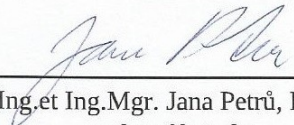
- [1] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2010, 138 s., ISBN 978-80-248-2278-4.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. 256 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] SADÍLEK, M.; ČEP, R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. *Odborná konference - Frézování IV*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, 13-18 s. ISBN 80-214-3239-X.
- [4] SADÍLEK, M. Vyspělé strategie ve 3D frézování. *MM Průmyslové spektrum*, 2004, č. 12, 46-47 s. ISSN 1212-2572.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014


Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě
9.5.2014

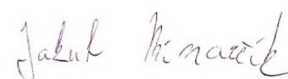
Jakub Krmář

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

9.5.2014
V Ostravě :



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jakub Minářčík

Adresa trvalého pobytu autora práce: Rolnická 30, 747 05 Opava

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MINARČÍK, J. *Frézování tvarových ploch s ohledem na přesnost: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 56 stran, 6 příloh, Vedoucí: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

V diplomové práci jsem se věnoval tématu frézování tvarových ploch s ohledem na přesnost. V teoretické části popisuji způsoby hrubovacích a dokončovacích strategií frézování tvarových ploch, také problematiku frézování při změně naklonění nástroje a drsnost povrchu. Praktická část je zaměřena na provedení experimentu s následným porovnáním frézování ve třech osách a v pěti osách s ohledem na výslednou drsnost povrchu a přesnost.

MINARČÍK, J. *Proposal of Machining Strategy of Free From Surface Milling to Increasing Accuracy: Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 56 p., 6 supplements, Thesis head: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

In this thesis I dealt with the topic proposal of machining strategy of free from surface milling to increasing accuracy. The theoretical part describes methods roughing and finishing milling strategies shaped surfaces, issues of milling tools when changing tilt and surface roughness. The practical part is focused on the implementation of the experiment followed by comparing the 3-axis milling and 5-axis milling considering resultant surface roughness and accuracy.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

1	ÚVOD	4
1.1	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	5
2	STRATEGIE PŘI FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH	6
2.1	TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH	6
2.2	STRATEGIE 3 – OSÉHO HRUBOVÁNÍ	9
2.3	STRATEGIE 3 – OSÉHO DOKONČOVÁNÍ.....	11
2.4	STRATEGIE VÍCEOSÉHO FRÉZOVÁNÍ	13
2.5	PROBLEMATIKA PŘESNOSTI PŘI ZMĚNĚ POLOHY OSY NÁSTROJE	15
2.6	DRSNOST OBROBENÉHO POVRCHU.....	16
2.7	PŘEHLED ANALÝZ TVAROVÝCH PLOCH.....	18
3	ZHODNOCENÍ A ROZBOR OBRÁBĚNÝCH PLOCH ZADANÉ SOUČÁSTI	20
3.1	EXPERIMENT – POPIS VÝROBKU	20
3.2	POUŽITÝ STROJ	21
3.3	POUŽITÝ NÁSTROJ	23
3.4	POUŽITÝ MATERIÁL	24
4	APLIKACE NAVRHOVANÝCH STRATEGIÍ SE ZAMĚŘENÍM NA PŘESNOST	25
4.1	ZVOLENÉ STRATEGIE PŘI EXPERIMENTU	25
4.2	TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY PŘI EXPERIMENTU.....	31
5	ZHODNOCENÍ A ROZBOR DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	32
5.1	POROVNÁNÍ OBROBENÉ SOUČÁSTI S MODELEM	32
5.2	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU.....	37
5.3	MĚŘENÍ PŘESNOSTI POVRCHU	44
5.4	SROVNÁNÍ TAŽENÝ - TLAČENÝ NÁSTROJ PŘI FRÉZOVÁNÍ	49
6	ZÁVĚR.....	50
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	53
9	SEZNAM PŘÍLOH	55

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ A SYMBOLŮ

Značení	Význam	Jednotka
CAD	Počítačem podporovaný návrh	[-]
CAM	Počítačem podporovaná výroba	[-]
CNC	Počítačem číslíkově řízený stroj	[-]
C 40 U	CNC Obráběcí centrum	[-]
HB	Tvrdost dle Brinella	[-]
HRC	Tvrdost dle Rockwella	[-]
NC	Číslíkově řízený stroj	[-]
R	Poloměr frézy	[mm]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R _c	Průměrná výška prvků profilu	[μm]
R _{ku}	Špičatost posuzovaného profilu drsnosti	[μm]
Rm	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
Rp	Největší výška výstupku profilu	[μm]
Rq	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
RΔq	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	[μm]
R _{SK}	Šikmost posuzovaného profilu drsnosti	[μm]
RSm	Průměrná šířka prvků profilu	[μm]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
Rz	Největší výška profilu	[μm]
SJ-401	Zařízení pro měření drsnosti	[-]
U _C	Rozšířená kombinovaná nejistota	[μm]

a_p	Hloubka řezu	[mm]
a_e	Šířka řezu	[mm]
d	Průměr frézy	[mm]
d_{eff}	Efektivní průměr nástroje	[mm]
f_z	Posuv na zub	[mm]
h_j	Okamžitá tloušťka odebírané vrstvy	[mm]
l_n	Vyhodnocovaná délka drsnosti	[mm]
l_r	Základní délka drsnosti	[mm]
n	Otáčky vřetene	[min ⁻¹]
$s(\bar{x})$	Směrodatná výběrová odchylka	[μm]
u_A	Standardní nejistota typu A	[μm]
u_b	Standardní nejistota typu B	[μm]
u_c	Kombinovaná standardní nejistota	[μm]
v_c	Řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
$v_{c,eff}$	Efektivní řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_f	Posuvová rychlost	[m·min ⁻¹]
\bar{x}	Průměrná hodnota	[μm]
x_i	Naměřená hodnota	[μm]
β_n	Úhel naklonění nástroje ve směru kolmém na posuv	[°]
π	Ludolfovo číslo	[-]
λ	Úhel sklonu ostří	[°]
γ	Úhel čela	[°]

1 ÚVOD

Při neustálém rychlém vývoji moderních technologií, by se mohlo zdát, že konvenční obrábění strojních součástí je na ústupu. Avšak pravdou je, že typický způsob obrábění za pomoci řezného nástroje, kdy utváříme součást odstraňováním materiálu ve formě třísek, má stále své pevné místo ve strojírenské výrobě. Je to způsobeno rovněž úspěšným vývojem, který proběhl v několika minulých letech.

V současnosti důležitým aspektem pro jakoukoliv firmu obchodující na trhu je pojem kvalita. A pokud mluvíme v oboru strojírenství o kvalitě je potřeba přikládat zvláštní důraz na přesnost. Protože termín přesnost nám skrývá celou řadu důležitých faktorů, jako jsou např. rozměry, tvar či drsnost povrchu. Požadavky na přesnost se mohou lišit v závislosti na druhu výroby či typu výrobku a jeho následného využití.

O automatizaci se snad mluví všude. Jde však o mnohem více než jen o módní pojem. Za pomoci moderních 5osých obráběcích center jsme schopni obrobít téměř jakoukoliv plochu či atypický tvar. Samotný stroj by nemohl vyřešit kompletní problém výroby složitého tvaru, avšak s precizním vývojem řezných nástrojů, jež jsou zhotoveny z velice kvalitních materiálů, je to zcela jistě možné. Rovněž je velice důležitý vývoj CAD/CAM systému, díky kterým jsme schopni vytvořit obráběcí postup pro složitou součást.

O společnosti OSTROJ a.s.

Tato diplomová práce by nevznikla bez firmy Ostroj a.s., která byla tak laskava a umožnila mi provést experiment. Firma je rozdělena do několika divizí. Součástí strojového parku divize Hydrauliky je pětiosé CNC obráběcí centrum, na němž byl experiment uskutečněn.

Firma s více jak šedesátiletou tradicí sídlí v Opavě. Pátevní složkou výrobního programu je zejména výroba důlních zařízení pro těžbu v hlubinných dolech. Konkrétně se jedná o hřeblové a pásové dopravníky, mechanizované výztuže, pásové vleky, hydraulické stojky a válce. Za výrobu hydraulických prvků, hydraulických válců, lisů, převodových skříní, dílů pro hydromotory či ozubených kol je odpovědná divize Hydraulika [1].

1.1 Cíle diplomové práce

- Popsat strategie víceosého obrábění.
- Zabývat se nakloněním nástroje při frézování tvarových ploch.
- Provést experiment na dvou vzorcích s nakloněním a bez naklonění nástroje.
- Popsat porovnání obrobeného povrchu s modelem v MasterCamu.
- Provést měření drsnosti v podélném a příčném směru.
- Popsat výsledky přesnosti na 3D souřadnicovém zařízení.

2 STRATEGIE PŘI FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH

Úvodem je věnovat pojům vyskytujícím se při frézování tvarových ploch. Dále zhodnotíme několik základních strategií 3osého a víceosého frézování. Zmíníme se o problémech vznikajících při naklonění nástroje a další kapitola bude věnována drsnosti obrobeného povrchu, především základním parametrům povrchu. A na závěr rozebereme studie, jež byly vytvořené v dané problematice.

2.1 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH

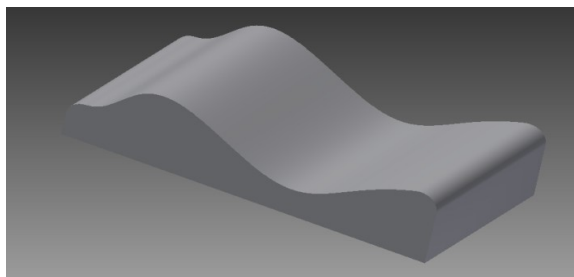
Před příchodem využívání NC a CNC obráběcích strojů se uplatňovaly pro obrobení tvarové plochy tyto způsoby [2]:

- aplikací speciálních tvarových řezných nástrojů,
- využití sdružených posuvů na konvenčních frézkách,
- frézování tvarových ploch kopírovací metodou na konvečních frézkách.

Výše popsané typy frézování tvarových ploch se uplatňují v případě obrábění základních, tedy jednodušších tvarů součástí, kde není nutný současný pohyb ve 3osách. Avšak v situacích, kdy jsou plochy znatelně komplikovanější, přichází v úvahu pouze využití CNC obráběcích strojů, pak se frézování rozděluje na 3osé a víceosé [2].

Existuje také celá řada metod, jsou označovány společným termínem Nekonveční metody obrábění, s jejichž pomocí lze rovněž obrábět tvarové plochy. Do této skupiny můžeme zařadit Elektroerozivní obrábění či Elektrochemické obrábění. Tyto způsoby výroby se vyznačují určitou škálou výhod, avšak vyskytují se u nich také nevýhody. Mezi ně patří především vyšší pořizovací náklady, komplikovanější údržba zařízení a vyšší požadavky na obsluhující operátory.

Tvarovou plochou je myšlena plocha (viz. obr.2.1), kde je vyobrazena jak vnější tvarová část – výstupek neboli konvexní plocha, tak i vnitřní tvarová část - prohlubeň, označovaná také termínem otevřená tvarová kapsa [2].



Obr. 2.1 Obecná tvarová plocha

a.) 3osé frézování tvarových ploch

Frézování 3osé je zcela běžným prostředkem pro CNC obrábění tvarových ploch. Fréze je umožněn pohyb současně ve třech směrech. Toto lze aplikovat na tzv. tříosých CNC obráběcích zařízeních [2].

Nejčastěji se tímto způsobem obrábějí zápustky, formy, lisovací nástroje a tvarově složité součásti. Souhrn možných operací umožňují hrubování či dokončovací zcela pokryje požadavky při frézování tvarových ploch. Řada strategií poskytuje možnost plně využít možností moderních CNC zařízení s cílem dosažení co nejvyšší kvality výsledného povrchu obráběné strojní součásti [3].

b.) Víceosé frézování tvarových ploch

Frézování víceosé je souhrnný termín pro technologie frézování s využitím více jak tří os. Nejčastěji používanou technologií je 5osé frézování. Tuto technologii lze aplikovat na tzv. víceosých CNC obráběcích strojích [2].

Jedná se o velice progresivní způsob frézování tvarových ploch. Touto metodou je umožněno obrábět plochu s jakoukoli orientací. To lze provést souvislým pohybem vřeteníku či obrobku, který je upnut na kolébkovém stole, nebo případnou kombinací obou způsobů. Stopková fréza je nejčastější volbou pro 5osé simultánní frézování. Stopková fréza s rádiusem v rohu umožňuje kontinuálně usměrňovat naklápění nástroje vzhledem ke tvarovým plochám obráběného povrchu. Běžný postup v případě 3osého frézování je pak kompenzován mnohem preciznějšími a speciálními moduly CAM systémů pro tvorbu 5osého frézování. Konečná fáze obrábění poté dosahuje vysoké přesnosti a kvality obrobeného povrchu s pomocí aplikace co nejvhodnější volby strategie pro obrábění [2].

Při programování 5osého obrábění se v současnosti vývoj ubírá dvěma cestami. První směr určují přímo konkrétní výrobci CAD/CAM systémů, kteří pomocí vlastních schopností vyvíjejí nové moduly 5osého plynulého obrábění (DP Technology/Estprit, Delcam/PowerMILL, Open MIND/HyperMILL, Sescoi/WorkNC). Druhou cestou je 5osé souvislé obrábění vyvíjené firmou Module Works. Společnost Module Works je poskytovatelem 5osého souvislého obrábění pro celou řadu vrcholových společností zabývajících se CAD/CAM systémy. Mezi ty hlavní můžeme jmenovat např. SolidCAM, Mastercam, EdgeCAM a mnoho dalších [2].

Základní výhody 5osého frézování [2]:

- možnost kompletního obrobení součásti,
- použití vyšší řezné i posuvové rychlosti,
- odstranění v průběhu výroby operace s použitím nekonvečních technologií,
- možnost aplikace naklonění nástroje => předcházení kolizí mezi nástrojem a obrobkem a držákem nástroje s obráběnou plochou,
- eventuelně aplikace naklonění nástroje z důvodu zvýšení kvality a přesnosti frézovaného povrchu a zvýšení trvanlivosti nástroje,
- snížení času výroby => efektivnější způsob výroby,
- schopnost tvorby konst. průřezu třísky,
- možnost použití kratších nástrojů => ekonomicky výhodné.

Nevýhody použití 5osého frézování [2]:

- vyšší pořizovací náklady,
- vyšší požadavky na technologa a obsluhu stroje,
- složitější vizualizace a možný vznik kolizí,
- vyšší náklady na opravu a příslušenství stroje.

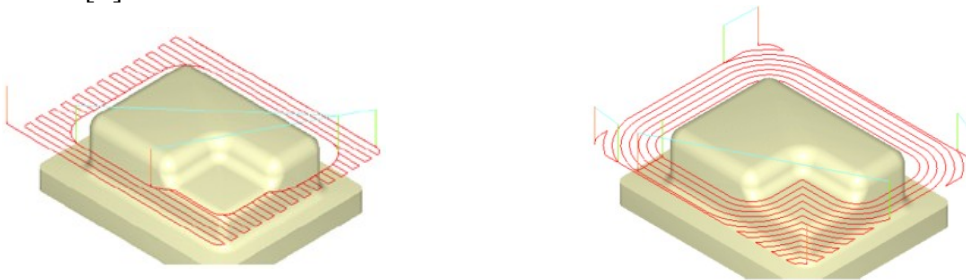
2.2 STRATEGIE 3 – OSÉHO HRUBOVÁNÍ

Hrubování slouží ke komplexnímu vyhrubování materiálu obrobku. Při aplikaci hrubovacích strategií je potřeba nastavit přídávky materiálu na dokončování. Probíhá postupně po krocích v ose Z, přičemž vygenerované dráhy nástroje v záběrech, tedy geometrie pro specifikování místa odebíraného materiálu, se řídí dle tvaru modelu vytvořeném např. v Autodesk Inventor. Rovněž je možnost volit také různé kombinace dutin a nálitků [2].

Obráběcí cykly pro 3-osé frézování:

- Strategie hrubování Z průřezů

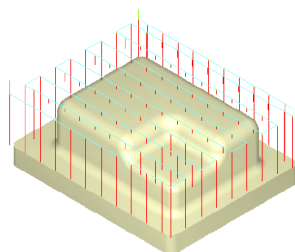
Materiál ve formě třísky je odebírán ve vodorovných (horizontálních) úrovních. Tento způsob obrábění (viz. obr. 2.2) je velice efektivní v případech potřeby odebíráni velkých objemů materiálu. Prování se frézou o velkém průměru před aplikací dokončovacích metod obrábění [2].



Obr. 2.2 Strategie hrubování Z průřezů lineární (vlevo,) kapsování (vpravo) [4]

- Strategie odvrtávání – zapichování osou nástroj

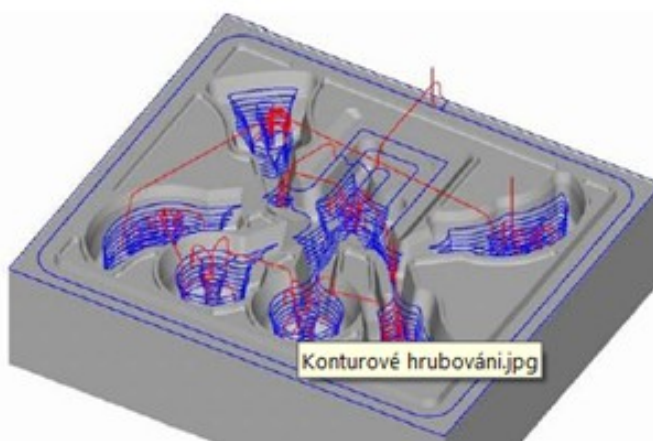
Tato hrubovací strategie je rovněž označována termínem Svislé hrubování (viz. obr. 2.2). Používána pro úběr velkého množství materiálu. Obrábění probíhá tak, že dochází k zapichování při využití vhodného nástroje. Nástroj provádí sérii vrtacích pohybů v sestavené síti bodů. Pohyby nástroje jsou podobné technologii vrtání [2].



Obr. 2.3 Strategie odvrtávání – zapichování osou nástroje [4]

- Strategie konturového hrubování

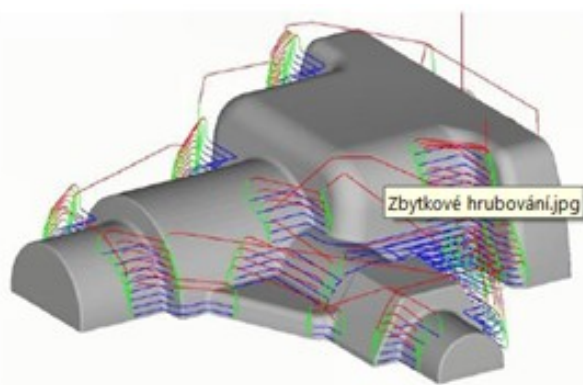
Taktéž konturové hrubování je hrubovací strategie a je využívána při obrábění velkého množství materiálu. Na určité úrovni osy Z jsou generovány série řezů, jimiž docílí odstranění maximální velikosti materiálu. Výsledná hloubka řezu se samočinně přizpůsobuje, díky čemuž je zajištěno obrobení rovinných ploch. Často je využíván spirálový nájezd [5].



Obr. 2.4 Konturové hrubování [6]

- Strategie zbytkového hrubování

Zbytkové hrubování, jak napovídá název, slouží k odebírání zbytkového materiálu vzniklých po předchozích operacích. Zbytkový materiál vznikl z důvodu, že nástroj byl příliš velký a nevešel se do určitých míst, aniž by došlo ke kolizi s polotovarem. Údaje pro stanovení velikosti a tvaru zbytkového materiálu získáme z porovnání aktuálního stavu obrobení s finálním tvarem. V případě obrábění rozměrných součástí, pak volba této strategie umožňuje zvolit více hrubovacích operací s různými nástroji. Obrábění probíhá např. v konstantních Z-ových úrovních, nebo vrtacími pohyby [2].

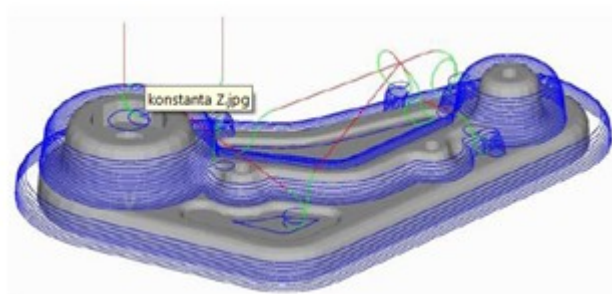


Obr. 2.5 Strategie zbytkového hrubování [6]

2.3 STRATEGIE 3 – OSÉHO DOKONČOVÁNÍ

- Dokončovací strategie Z průřezy

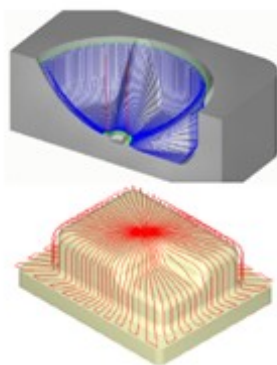
Strategie bývá také označována pojmem Konstant Z, či termínem Dokončování po vrstevnici. Vygenerované dráhy vycházejí z rovnoběžných řezů dle tvaru obráběné součásti v jednotlivých Z úrovních. Volba této strategie je výhodná při před dokončování a dokončování příkrých tvarů. Nejčastěji je tento způsob používán při výrobě součásti zahrnující velké svislé části, ve kterých by strategie řádkování nebyla vhodná z důvodu neuspokojivých výsledků. Za pomoci omezujících úhlů lze redukovat aplikování tohoto způsobu pouze na strmé plochy a na obrobení rovinných ploch pak použít vhodnější strategii [2].



Obr. 2.6 Dokončovací strategie Z průřezy[6]

- Dokončovací strategie paprsková

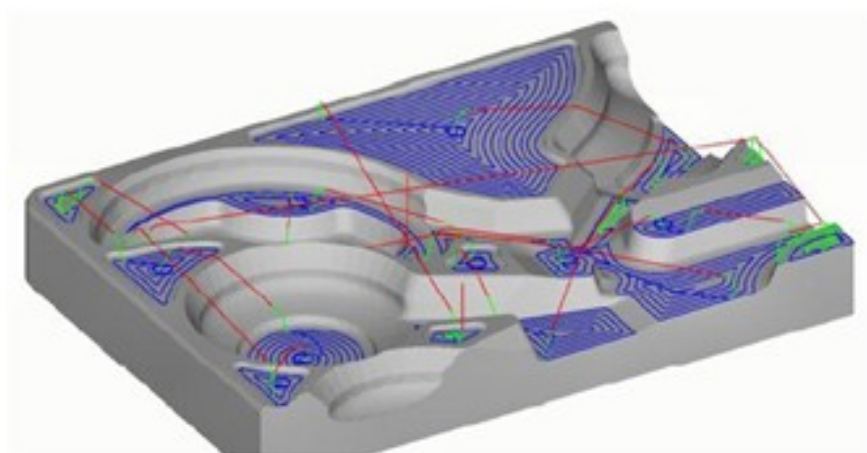
Strategie je mimo jiné také označována termínem radiální obrábění. Paprsková strategie je nejčastější metoda obrábění pro součásti kruhového či hvězdicového tvaru s mělkými zakřivenými rovinami. Veškeré dráhy se větví ze stejného středového bodu s možností vypuštění zvolené oblasti kolem zadaného středu, kde by mohlo docházet k nadměrnému zahuštění drah. Lze zvolit přírůstkový úhel, o který se má nástroj pohybovat od středu [2].



Obr. 2.7 Dokončovací strategie paprsková [6]

- Strategie vodorovné oblasti

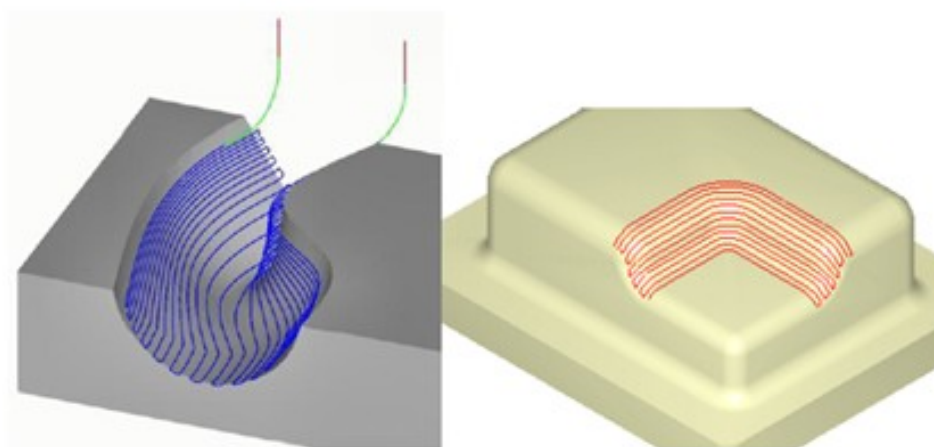
Obrábění rovin je strategie, jež umožňuje obrábět všechny vodorovné rovinné oblasti na součásti. Vybrané dráhy jsou zcela vyhlazeny co nejeфекtivnějším způsobem. Jsou aplikovány obdobně jako způsoby zavrátání (po šroubovici, rampováním) a dochází k vyhlazení drah přejezdů nástroje. Programátor má možnost nastavení libovolného počtu úběrů [2].



Obr. 2.8 Strategie vodorovné oblasti [6]

- Strategie obrábění mezi křivkami

Tato strategie je výhodná v tom, že programátorovi umožňuje zvolit dvě křivky, mezi nimiž bude probíhat obrábění. Nezáleží na tom, zda jsou křivky otevřené nebo uzavřené. Umožňuje nám volbu směru obrábění, tedy rovnoběžně nebo kolmo na zvolené křivky. Vygenerovaná dráha nástroje je tvořena postupnými přechody od první křivky ke křivce druhé v závislosti na geometrickém vzhledu obou křivek [6].



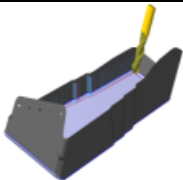

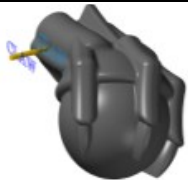
Obr. 2.9 Dokončovací strategie mezi křivkami [6]

2.4 STRATEGIE VÍCEOSÉHO FRÉZOVÁNÍ

V této podkapitole jsou uvedeny obráběcí cykly uplatněné systémem MasterCam, jenž je vlastníkem společnost Module Words. Rovněž tyto cykly jsou použity u mnoha dalších CAM systémů. Cykly zobrazeny v následující tab.2.1 jsou rozděleny do několika kategorií.

Tabulka 2.1 Přehled víceosých strategií

Křivka	
Swarf – bokem frézy	
Pružné řádky	
Víceplošné	
Kanál	
Rotační	
Přechod mezi dvěma křivkami	

Rovnoběžné s násobnými křivkami	
Záběry podle křivky	
Promítnutí křivek	
Rovnoběžné s plochami	
Rovnoběžné záběry	
Přechod mezi dvěma plochami	
Trojúhelníková síť	
Díry	
Kruhové frézování	
Převod do 5 os	

2.5 Problematika přesnosti při změně polohy osy nástroje

Působení sil řezání na stopkovou frézu může do značné míry ovlivnit konečný výsledek obrábění, tedy složky radiální, axiální a tangenciální síly řezání jsou často příčinou odtlačení nástroje. Tento úkaz vede ke zvyšování nepřesnosti při obrábění [7].

Z hlediska navrhovaného postupu obrábění je nutné se zabývat výhodami, či nevýhodami, jež se docílí při změně polohy osy nástroje vůči obrobku, především nás zajímá přesnost obrobeného povrchu [8].

Při konvečním způsobu frézování ve třech osách je osa nástroje pevná. Z tohoto důvodu při frézování kulovou frézu dochází v konečné fázi obrábění k přesnému dokončování. Dochází k celé řadě vlivů, jež jsou pro výslednou kvalitu a přesnost povrchu značně nežádoucí. Tyto vlivy jsou zapříčiněny nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje. Nežádoucí vlivy, o které se jedná, jsou pěchování třísky, zvýšená teplota v místě řezu, zvýšená tvorba nárůstků v místě styku nástroje s materiálem.

Nevyskytuje se mnoho odborných prací zabývajících se praktickým porovnáním přesnosti obrobené tvarové plochy mezi tříosým frézováním a pětiosým frézováním s využitím změn polohy osy nástroje. Mezi hlavní příčiny můžeme zařadit technickou a finanční náročnost experimentálních prací [8].

Přechod záběru lze převést na změnu náklonu obrobku vůči nástroji. Následně můžeme vyvodit tyto závěry. Snížení odtlačení použitého nástroje je možné docílit rovněž volbou vhodné polohy osy nástroje vzhledem obráběné ploše strojní součást [8].

Důležitým činitelem je rovněž volba sousledného nebo nesousledného způsobu frézování tvarových ploch. Oba způsoby frézování se vyznačují jistými výhodami i nevýhodami. Avšak co se týče kvality a přesnosti konečného povrchu, je výhodnější zvolit sousledné frézování.

Pro zjišťování docílené přesnosti obrobené součásti ve strojírenské praxi slouží celá řada speciálních zařízení a důmyslných metod. Mezi ně patří např. distanční analýza povrchu, či možnost porovnání obrobeného povrchu v CAM systému s modelem výrobku. Tyto postupy dokážou zobrazit číselné odchylky od modelu, kterým pak odpovídají barevná zobrazení na povrchu součásti.

2.6 Drsnost obrobeného povrchu

Povrch obrobené plochy vytváří prostorový útvar, z tohoto důvodu dochází při aplikování jakéhokoliv způsobu obráběcí metody ke vzniku určitých nerovností. Tematický okruh týkající se posuzování nerovností je stanoven redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. Tímto postupem dojde ke vzniku profilu, jenž slouží jako základní zdroj potřebných informací [9].

Při zkoumání drsnosti rozlišujeme dva typy nerovností, jedná se o makronerovnost a mikronerovnost. Termín makronerovnost je označení pro tzv. rovinnost povrchu (vlnitost) a pojem mikronerovnost je souhrnný název pro drsnost povrchu.

Míra nerovností charakterizuje strukturu obrobeného povrchu a rozděluje je do náležitých složek. Složka, která se vyznačuje nejmenší roztečí, tvoří drsnost povrchu a vlnitost povrchu složka, která je střední roztečí nerovností struktury povrchu. Geometrické parametry jsou definovány normou ISO 4287 [9].

Drsnost povrchu se hodnotí dle 3 základních parametrů [9]:

a.) Výškové parametry

Základní délka l_r je vzdálenost ve směru osy x je aplikována při rozpoznání nerovností charakterizující vyhodnocovaný profil.

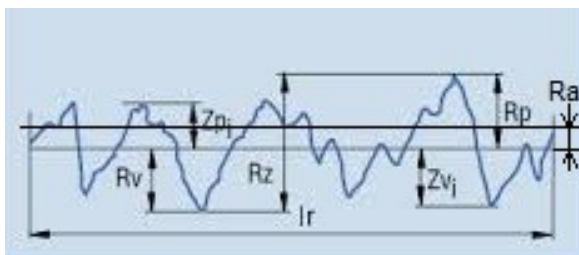
Největší výška profilu R_z je součet největší hloubky profilu Z_v a největší výšky profilu Z_p v rozsahu základní délky.

Střední aritmetická úchylka profilu R_a je aritmetický průměr absolutních hodnot $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$R_a = \frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2.6.1)$$

Největší výška výstupku R_p je nejvyšší hodnota výstupku profilu Z_p v rozmezí základní délky.

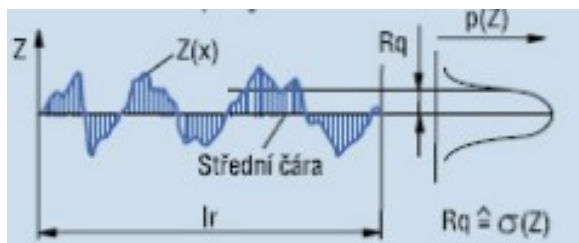
Největší hloubka prohlubně R_v je nejvyšší hodnota profilu Z_v v rozmezí základní délky.



Obr. 2.10 Výškové parametry profilu [10]

Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq je průměrná kvadratická hodnota odchylek $Z(x)$ profilu v rozsahu základní délky.

$$Rq = \sqrt{\frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} Z(x)^2 dx} \quad (2.6.2)$$

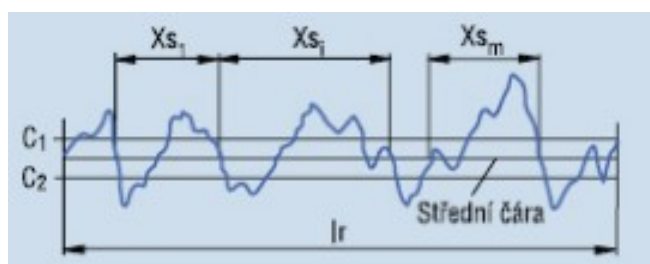


Obr. 2.11 Ukázka průměrné kvadratické úchylky profilu Rq [10]

b.) Tvarové parametry

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R\Delta q$ je průměrná kvadratická hodnota sklonů v rozsahu základní délky. Projevuje se při hodnocení odrazu světla, při galvanickém pokovování nebo při zjišťování tribologických vlastností je tento parametr velice důležitý.

c.) Délkové (šířkové) parametry



Obr. 2.12 Zobrazení délkových parametrů [10]

Průměrná vzdálenost prvků profilu RS_m je průměrná hodnota šířek Xs profilu v rozsahu základní délky.

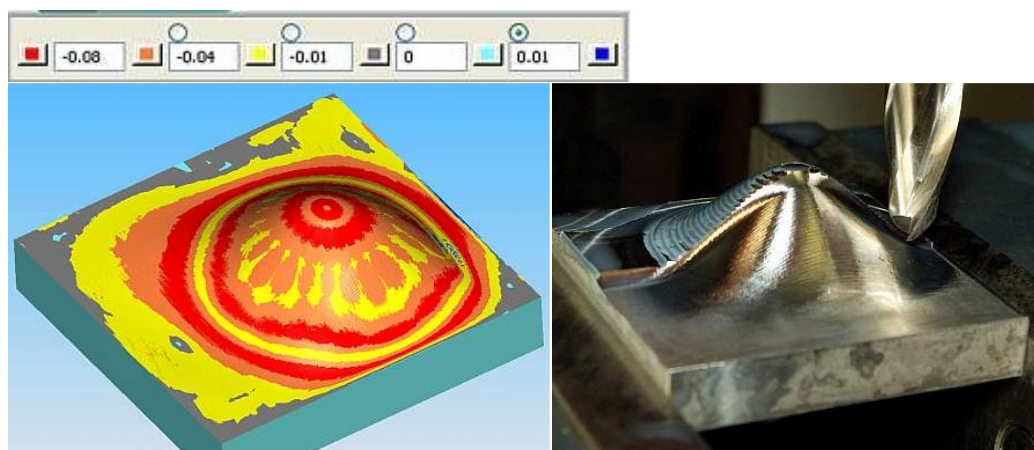
$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (2.6.3)$$

2.7 Přehled analýz tvarových ploch

A.)

Studie, která byla realizována na nejmenovaném univerzitním pracovišti, se rovněž zabývala porovnáním strategií frézování, jež jsou dostupné v CAM systému. Srovnání se provádělo na vzorku s libovolně vymodelovanou tvarovou plochou. Předmětem zkoumání byly tři polotovary o rozměrech 47 x 47 x 20 mm z duralu. Strategie, které byly použity, byly vybrány z nabídky, jež poskytuje systém SolidCAM 2009. Metoda hrubování byla zvolena pro všechny vzorky totožná, z důvodu zajištění rovnocenných počátečních podmínek. Nástrojem pro hrubování byla zvolena čelní válcová fréza \varnothing 18 mm a pro dokončování kopírovací fréza \varnothing 10 mm. Řezné podmínky byly určeny dle obráběného materiálu. Dokončování bylo provedeno třemi typy strategií. První z nich byla strategie označována termínem Z-úrovně obrábění. Strategie řádkování byla aplikována jako druhá. A na závěr byla použita strategie označována termínem spirála.

Na vzorcích byla měřena drsnost povrchu a také bylo provedeno srovnání časů vypočtený simulací s časem reálného obrábění. Získané výsledky drsnosti se pohybovaly okolo hodnot 1,4 - 1,9 násobku nadefinované hodnoty drsnosti povrchu a nejvíce vyhovujícího přiblížení se docílila u strategie spirála. Co se týče času, nejlepší shody se dosáhlo při strategii řádkování. Nevyhovující strategií dle výsledků byla strategie konstantní Z, výsledný vzorek měl značné nerovnosti v rohových částech [11].

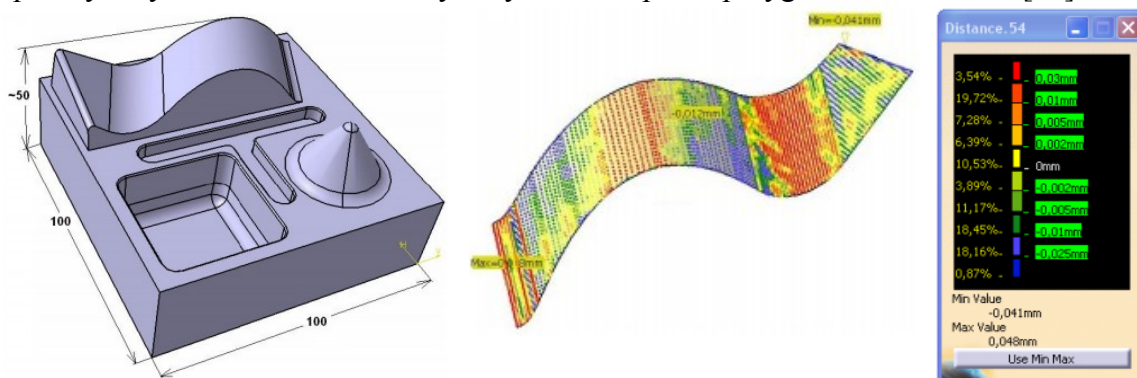


Obr.2.13 Analýza povrchu po strategii řádkování (vlevo), ukázka při frézování (vpravo) [11]

B.)

Další studie, která se zabývala vyhodnocováním tvarových ploch je práce s názvem Porovnání přesnosti digitalizované tvarové plochy s původní plochou modelu [12]. Tématem výzkumu bylo navržení součásti s výskytem konvexní, konkávní a obecné tvarové plochy. Součást se vyráběla pomocí 3osé a 5osé technologie frézování. Součástí práce bylo navržení metody digitalizace a způsob nasnímání měřené plochy. Výstupem poté bylo porovnání nasnímaných dat s modelem vytvořeném v CAD softwaru [12].

Z distanční analýzy bylo zjištěno, že největší počet odchylek se vyskytoval v rozmezí $<0.01; 0.03>$ na tvarové ploše součástí. Hodnota max. kladné odchylky činila $+0,048$ mm a velikost min. odchylky byla naměřena $-0,041$ mm. Příčina odchylek se usuzovala dle polohy a byla určena nedostatečným vyhlazením ploch polygonálního modelu [12].

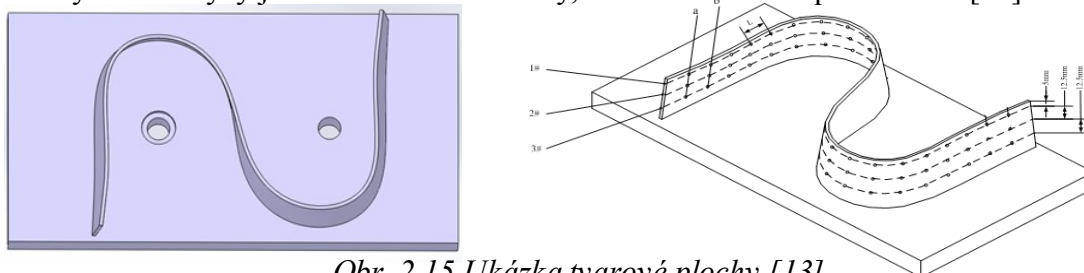


Obr. 2.14 Model součásti (vlevo); výsledky distanční analýzy (vpravo) [12]

C.)

Měření a vyhodnocování tvarových ploch neslouží pouze k vědeckým a výzkumným účelům. Ale také nachází své uplatnění v samotné strojírenské praxi. Kdy je potřeba prověřit či zkontrolovat obráběné plochy, ať už se jedná o požadavek samotného výrobce součásti, nebo v případě potřeby ověření ze strany dodavatele. Výrobce se tímto zaštití uje, že výrobky odpovídají předepsaným tolerancím.

Konkrétní příklad, kdy byly zkoumány tolerance tvaru profilu (viz. obr. 2.15). Byly aplikovány 3 řezy po 25 bodech, rovnoměrně rozložených na profilu (viz. obr. 2.15). Výsledky této analýzy jsou ve vlastnictví firmy, která toto měření požadovala [13].



Obr. 2.15 Ukázka tvarové plochy [13]

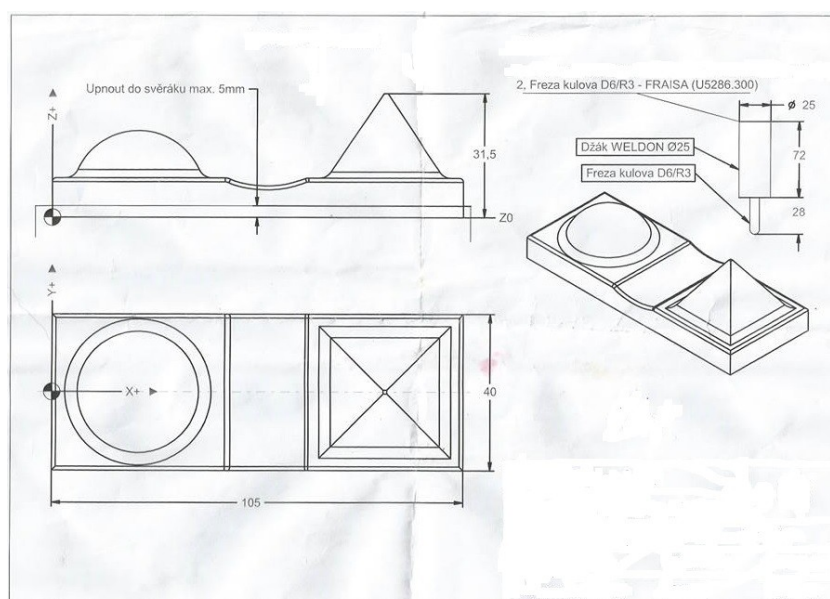
3 Zhodnocení a rozbor obráběných ploch zadané součásti

V této kapitole bude popsán výrobek, na němž byl proveden experiment, dále se budeme věnovat popisu aplikovaného stroje, nástroje a vlastnostem obráběného materiálu.

3.1 Experiment – popis výrobku

Tématem diplomové práce je frézování tvarových ploch s nakloněným nástrojem s ohledem na přesnost. Z tohoto důvodu byly zvoleny dva tvarové segmenty. Jedná se o kulový vrchlík a jehlan. Na těchto dvou tělesech včetně plochy mezi nimi (viz. obr. 3.1) bude prováděno měření a následné porovnání dosažených výsledků s ohledem na přesnost. Tyto tvary byly zvoleny z důvodu častého použití konvexní a konkávní plochy v praxi. V případě jehlanu byly jednotlivé plochy frézovány rozdílnými směry pohybu při použití řádkovací strategie. Budou získány hodnoty ze systému MasterCam a z měření na 3D souřadnicovém měřidle.

Frézování bude probíhat v první variantě bez naklonění nástroje (3osé frézování), zatímco v druhém případě se bude jednat o naklonění o úhel 15° ve směru posuvu (5osé frézování). Tato hodnota úhlu byla zvolena z rozmezí, které uvádí odborná literatura. V literatuře je dáno rozmezí od $10^\circ \div 30^\circ$. Rozmezí je stanoveno z důvodu, že nelze s určitostí zvolit nejvhodnější úhel polohy osy nástroje k obráběnému povrchu. V odborných studiích zahraniční literatury [14] se uvádí rozmezí $10^\circ \div 20^\circ$. S následným nakloněním nástroje bychom měli docílit lepších výsledků s ohledem na přesnost výroby.



Obr. 3.1 Dílenský náčrt experimentálního vzorku

3.2 Použitý Stroj

Zkušební vzorky shodného materiálu byly obráběny na 5osém obráběcím centru s označením C 40 U dynamic (obr. 3.2) od německé firmy HERMLE AG. Tyto vzorky byly obráběny ve firmě Ostroj a.s. v Opavě.

Zmiňované obráběcí centrum dle výrobce se vyznačuje spolehlivostí, výkonností a přesností výroby. Dále se výrobce zavazuje, že existující velký rozsah možností funkcí nám umožňuje vysoce precizní a ekonomicky úspornou výrobu daných součástí. Různým provedením automatizačního řešení docílíme mnohonásobného rozšíření spektra možností nasazení tohoto typu stroje. Multifunkční lože obráběcího centra tvoří hlavní část. Kvalita je zaručena v případě výroby strojů z minerálního odlitku nebo z materiálu EN-GJS-400. Při umístění několika obráběcích center do řetězce za sebou lze realizovat jednoduchým způsobem vysoce flexibilní a automatickou výrobu [15].



Obr. 3. 2 Obráběcí centrum HERMLE C40 U DYNAMIC [16]

Tabulka 3.1 Technické parametry stroje [15]:

Otáčky vřetene	[min ⁻¹]	20 ÷ 18 000
Výkon vřetene	[kW]	15
Počet pozic nástrojů	[ks]	80
Upínací plocha (ø stolu)	[mm]	800
Maximální rychlost	[m·min ⁻¹]	60
Pojezd v osách	[mm]	850 x 700 x 500
Otočný úhel	[°]	25 / -110
Chlazení	[-]	vnější, vnitřní
Řídicí systém	[-]	Heidenhain TNC 530

Firma Hermle prezentovala v roce 2002 na veletrhu svojí inovovanou řadu strojů C 40, tentokrát s přívlastkem "dynamic". Název "dynamic" připojila z důvodu, že se liší od standardní řady zvýšenými dynamickými parametry ve všech osách. Mezi zajímavé vlastnosti této řady strojů patří široká škála standardně nabízených vřeten je od otáček 10000 min⁻¹ (36kW/200Nm) až po 40000 min⁻¹ (26kW/7,5Nm). Uplatnění na trhu tento stroj získal především v odvětvích automobilového, energetického, leteckého i kosmického průmyslu [17].

Základní provedení V je 3osé s pevným stolem, následuje provedení U s kolébkou (A osa) a v ní integrovaným otočným stolem (C osa). Další provedení U je vybaveno kolébkou se dvěma menšími otočnými stoly a v poslední nabídce je modifikace pro obrábění z tyčových polotovárů (A osa) s automatickým přísuvem tyčoviny [15].

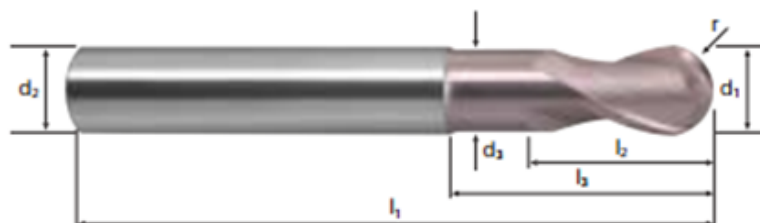


Obr. 3. 3 Ukázka kolébky s otočným stolem[16]

3.3 Použitý nástroj

Nástroj použitý pro experiment je univerzální především díky svému zaoblení. Umožňuje obrábět námi požadovaný tvar při svém nízkém opotřebení, vysokými rychlostmi a při velkém úběru materiálu. Tyto vlastnosti zaštituje výrobce firma Fraisa. Největší výhodou těchto fréz je hlavně v kvalitě obrobeného povrchu a to zejména v jeho drsnosti. K dosažení lepší drsnosti nám výrazně pomáhá naklonění nástroje. Řezné podmínky aplikované v tomto experimentu byly zvoleny v blízkosti hodnot, jež doporučuje výrobce kulové frézy viz. tabulka 3.3.

Kulová fréza ø6 - U5286.300



Obr. 3. 4 Rozměrové parametry kulové frézy [18]

Tabulka 3.2 Rozměrové parametry nástroje [18]:

Řád	$\varnothing d_1$ [mm]	$\varnothing d_2 h_6$ [mm]	$\varnothing d_3$ [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	R [mm]	α [°]	z [ks]
.300	6,0	6,0	5,5	57	7,0	20	3,00	0,0	2

Tabulka 3.3 Výrobce doporučené řezné podmínky nástroje [18]:

d_1 [mm]	v_c [m·min ⁻¹]	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	d_{eff} [mm]	n [min ⁻¹]	v_f [mm·min ⁻¹]
6	280	0,065	0,15	0,15	5,36	16630	2160

Tabulka 3.4 Technické parametry nástroje [18]:

λ [°]	γ [°]	Rm	HRC
30	-10	1100 ÷ 1300	48 ÷ 56

3.4 Použitý materiál

Materiál, který byl předmětem zkoumání, lze charakterizovat jako chrom - wolfram - křemík - vanadovou ocel, jenž se používá zejména pro práci za studena ke kalení nejčastěji v oleji. Tato ocel se vyznačuje střední hodnotou prokalitelností, velmi vysokou houževnatostí a rovněž dobrou odolností proti dynamickému namáhání a nárazům. Také se prokazuje dobrou odolnost proti opotřebení a stálost rozměrů v případě tepelného zpracování [19].

Nejčastější použití je u nástrojů pro stříhání a děrování za studena materiálů větších tloušťek a vyšších pevností. Dále různé typy nožů a nůžek. Taktéž nástroje pro tváření, zde se jedná o nástroje pro ražení složitých i jednoduchých tvarů, o nástroje pro protlačování a tlacení při nižších hodnotách tlaku [19].

Nové označení: 1.2550 (Cr-W-Si)

Staré označení: 19 735

Tabulka 3.5 Chemické složení materiálu [19]:

C	Mn	Si	Cr	W	V	Ni	P	S
0,55÷0,65	0,15÷0,4	0,45÷0,75	1,00÷1,3	1,80÷2,3	0,10÷0,25	0,25	max.0,03	max0,035

Tabulka 3.6 Technologické údaje pro tepelné zpracování oceli [19]:

Kování [°C]	Kalení v oleji [°C]	Popouštění [°C]	Žihání ke snížení pnutí [°C]	Žihání na měkko [°C]
850 ÷ 1100	870 ÷ 900	180 ÷ 400	600 ÷ 650	710 ÷ 750

Tabulka 3.7 Mechanické vlastnosti a popouštěcí teploty v závislosti na tvrdosti [19]:

Tvrdost HB max po žihání na měkko.	Tvrdost HRC max. po kalení	Popouštěcí teplota [°C]				
		Tvrdost HRC				
230	61	100	200	300	400	500
		60	59	56	52	48

4 Aplikace navrhovaných strategií se zaměřením na přesnost

V následující kapitole se zaměříme na strategie použité při experimentu a popíšeme technologické podmínky, které provázely frézování výrobku.

4.1 Zvolené strategie při experimentu

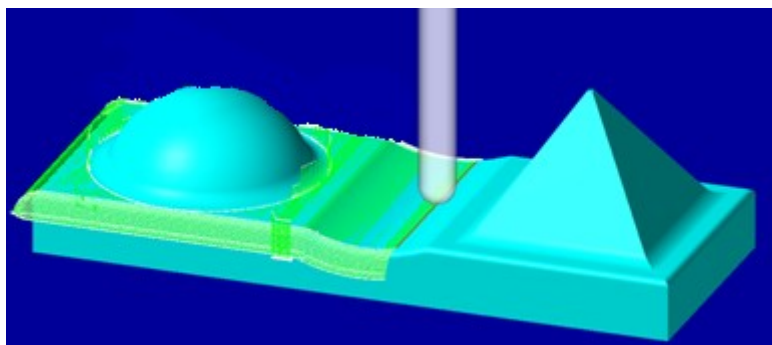
- Standardní strategie hrubování
- Strategie řádkování
- Strategie spirálová

Počáteční proces obrábění, tedy hrubování, nemá podstatný vliv na přesnost konečného tvaru. Bylo potřeba pouze zvolit polotovar a obrobít ho do přibližné podoby konečného produktu. Z tohoto důvodu byl zvolen v počítačovém systému MasterCamu nejeftivnější způsob, a tím byla – Standardní strategie hrubování. Pro dokončovací operace byl ponechán přídavek 1 mm na všech plochách vzorku.

Pro následné dokončování byly zvoleny strategie řádkování pro segment tvaru jehlanu, přičemž jednotlivé strany byly frézovány rozdílnými způsoby (viz. tabulka 4.1). Dokončovací strategie pro kulový vrchlík byla aplikována strategie spirálová. Plocha mezi oběma útvary byla frézována strategií řádkování.

NC program pro oba experimenty byl zhotoven s pomocí tzv. dílenského programování přímo v řídicím systému stroje a s pomocí CAD/CAM systému MasterCAM.

Řádkování je jedna z nejčastěji používaných dokončovacích strategií. Především tato strategie nachází své využití při dokončování mělkých tvarů a v případě relativně mírného zakřivení jednotlivých ploch. Dílčí trasy nástroje jsou vzájemně rovnoběžné ve směrech XY, přičemž ve směru Z pak následně napodobují, tedy kopírují, obráběný tvar. Linii drah i jejich velikost rozstupů lze libovolně volit dle potřeb programátora [6].



Obr. 4. 1 Ukázka strategie řádkování na experimentálním vzorku

Útvar tvaru jehlanu umožňoval vyzkoušet několik variant pohybu nástroje, a tím zjistit nejvhodnější volbu v případě frézování tvarových ploch při použití strategie řádkování. Abychom ze získaných výsledků a jejich následného porovnání mohli určit nejefektivnější, a tedy nejpresnější způsob frézování šikmé plochy a stanovit kdy dochází k obrobení potřebného tvaru v adekvátní přesnosti. Zvolené způsoby frézování byly aplikovány také proto, abychom potvrdili či vyvrátili tvrzení týkající se zvýšení přesnosti výroby strojních součástí při použití nástroje taženého, tlačného. Cílem bylo zjištění, zda oboustranné (tzv. cik-cak) řádkování se vyznačuje nejen kratší dobou obrábění, ale zda má také vliv na kvalitu a přesnost výroby a v neposlední řadě také, zda jsou dosažené rozdíly při obrábění 3osém či 5osém malé, či dokonce zanedbatelné.

Důležitou zásadou při obrábění šikmých ploch je aplikace a využívání co největší možné rezné rychlosti na používaném nástroji, kterou je možno dosáhnout správnou orientací směru pohybu kulové frézy vůči sklonu stěny zápusťky nebo formy. Proto je nutné programovat pohyb nástroje tak, aby maximální šířka odebíraného materiálu byla obráběna tou částí nástroje, která je v dané chvíli vůči ose kulové frézy na co největší hodnotě průměru [20].

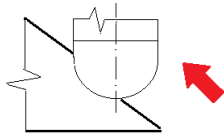
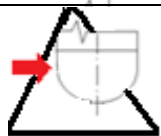
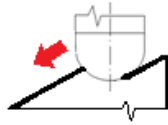

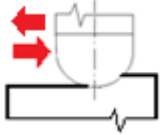
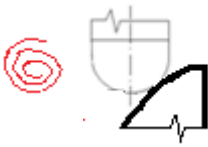
Těmto problémům se v dnešní době lze vyvarovat za pomoci petiosého řízení nakláněním nástroje. Tak je možné se v případě kulových fréz vyhnout jejich nejnevýhodnějšímu místu, jež je na středu frézy [20].

Plochy na experimentálním vzorku byly rozděleny do šesti úseků, označení úseků viz. Obr. 4.2 a směr a způsob frézování viz Tabulka 4.1.



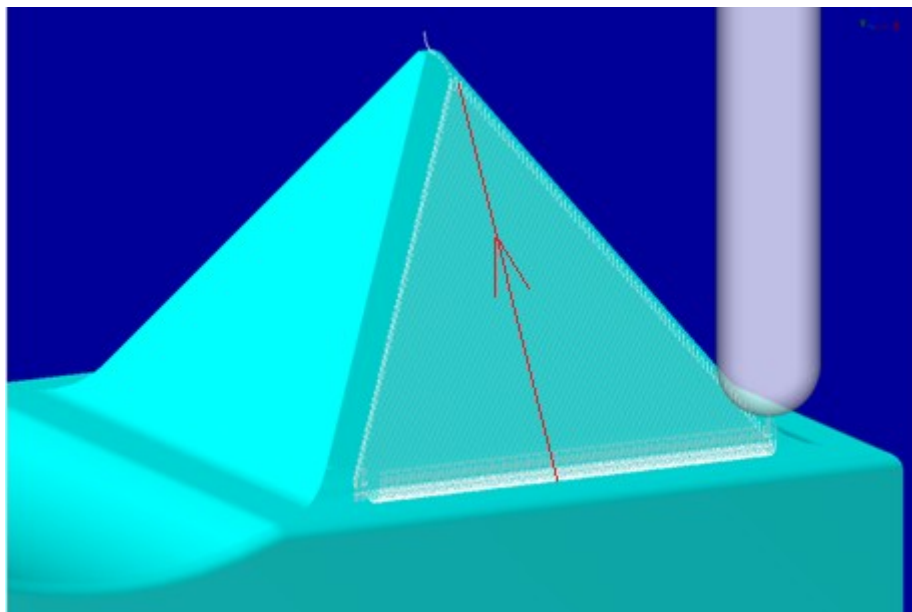
Obr. 4. 2 Rozvržení ploch na jednotlivých útvarech

Tabulka 4.1 Pohyby frézy po jednotlivých plochách

Číslo plochy	Tvar plochy	Způsob frézování	Grafické zobrazení
1	Jehlan	Zesponu nahoru – svisle	
2	Jehlan	Zesponu jednosměrně – vodorovně	
3	Jehlan	Shora dolů – svisle	
4	Jehlan	Shora oboustranně – vodorovně	
5	Plocha mezi útvary	Oboustranně – vodorovně	
6	Kulový vrchlík	Spirálově	

- Jehlan plocha 1 – strategie svislé řádkování zespodu - tažený nástroj

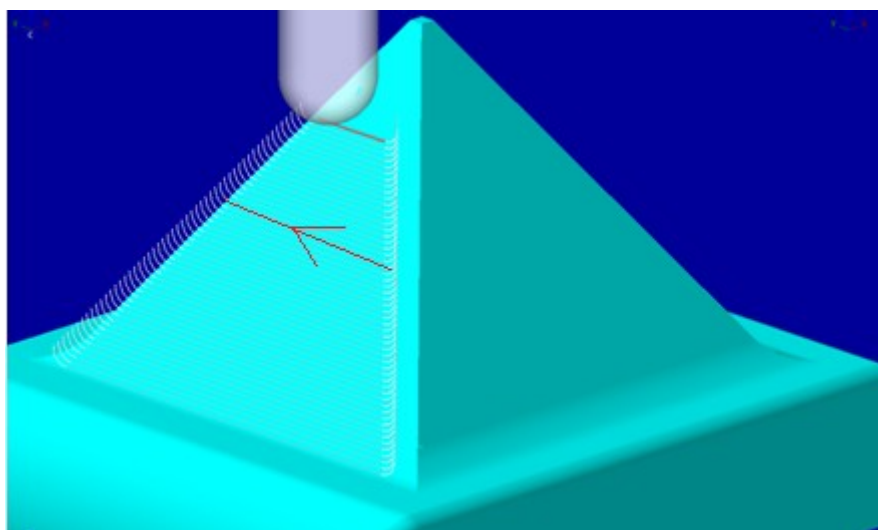
V prvním případě se jedná o tzv. tažený nástroj. Dle celé řady odborných studií tažený nástroj poskytuje řadu výhod mezi, ně patří například znatelně tišší chod, rovněž se zlepšuje dosažená kvalita obráběné součásti, tedy výsledná přesnost je lepší.



Obr. 4. 3 Strategie svislé řádkování zespodu

- Jehlan plocha 2 – strategie vodorovná řádkování zespodu – tažený nástroj

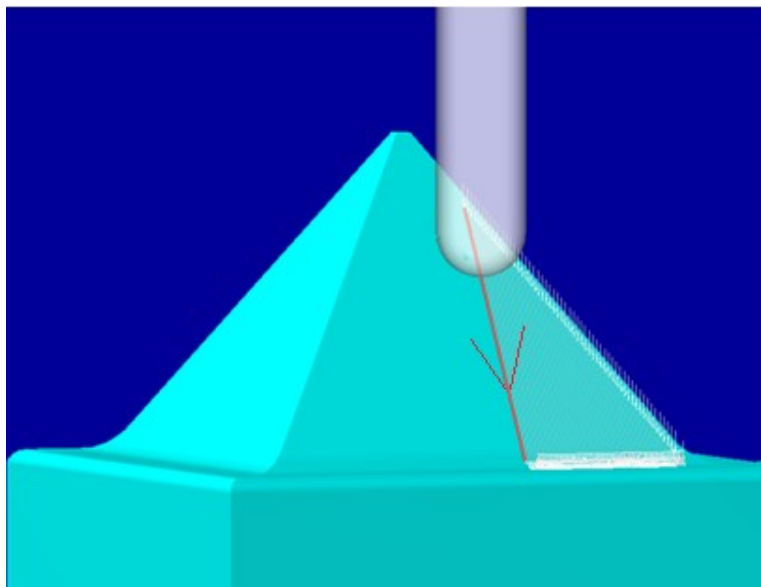
V následující variantě bylo zvoleno řádkování ve směru osy Y jen jedním směrem. Nástroj se vždy vrací na původní stranu obrábění po vytvoření předepsané dráhy, z čehož vyplývá, že vznikají velké časové ztráty, neboť nástroj během přejíždění není využit.



Obr. 4. 4 Strategie vodorovné řádkování zespodu

- Jehlan plocha 3 – strategie svislé řádkování shora – tlačení nástroj

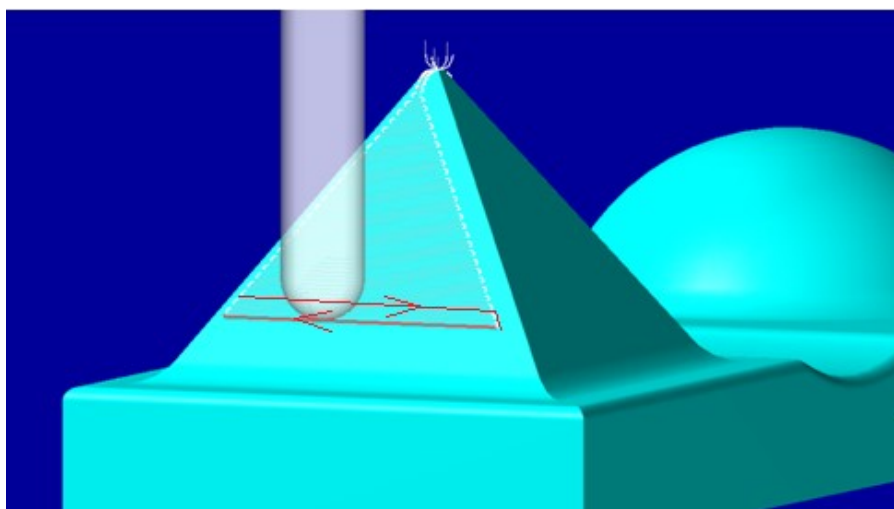
V tomto případě se jedná o variantu, kdy nástroj je tzv. tlačný. Tento způsob nepřináší tolik výhod, na rozdíl od varianty tzv. taženého nástroje. Avšak pro experiment byl použit z důvodu porovnání naměřených výsledků obou variant.



Obr. 4. 5 Strategie svislé řádkování shora

- Jehlan plocha 4 – strategie vodorovná řádkování shora – tlačení nástroj

Poslední variantou je způsob obrábění, v praxi někdy nazývaný termínem cik-cak. Tato varianta velice snižuje dobu potřebnou pro obrobení dané plochy, poněvadž využívá veškerého času pro obrábění.

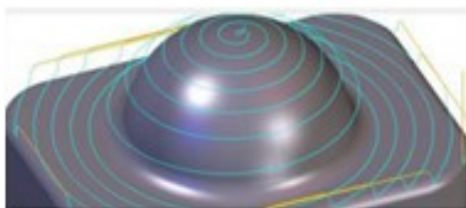


Obr. 4. 6 Strategie vodorovné (cik-cak) řádkování shora

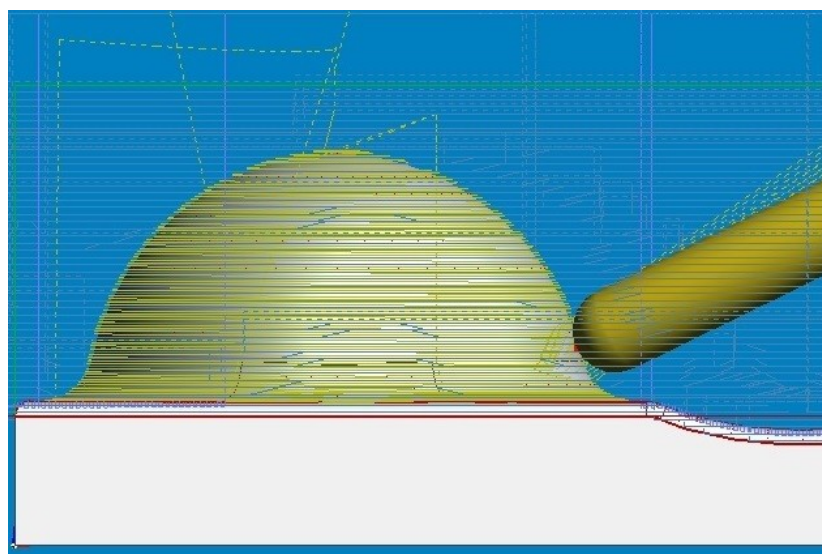
Spirálová strategie dokončování se programuje v případě dokončování útvarů, jež mají přibližně kruhový tvar, tedy především pro součásti tvaru kulového vrchlíku. Dráha nástroje odpovídá tvaru spirály. Proces obrábění začíná na nejvyšším bodě kulového vrchlíku, nebo na nejnižší hloubce obrábění, přičemž udržuje nepřetržitý kontakt mezi nástrojem a obráběným povrchem při obrábění v určených hranicích. Následně krok dolů je definován rozdílem hodnoty mezi dvěma prstenci dráhy. Výchozí bod je definován dvěma způsoby. První způsob je automaticky zvolený bod, jenž určí CAM systém a druhá varianta je manuální volba samotným programátorem [2].

Spirálové frézování je velice výhodné v případech, kdy sklon obráběných ploch je malý. Dokonce je ho možné použít i v momentě, kdy zmiňovaný sklon je roven nule a kdy je rovněž možnost dodržení neměnných záběrových podmínek [20].

Jako je tomu skoro ve všech odvětvích, kterým se člověk zabývá, existuje i zde neustálý pokrok a možné vylepšení, jež nabízejí firmy zabývající se CAM softwary. Jedná se o generování přizpůsobivé spirály, která se tvaruje podle obráběného geometrického tvaru a umožňuje maximální využití doby nástroje v pracovní poloze [21].



Obr. 4. 7 Názorné zobrazení pohybu při spirálové strategii [6]



Obr. 4. 8 Ukázka spirálové strategie na experimentálním vzorku

4.2 Technologické podmínky při experimentu

Z ekonomických a časových důvodů je nutné zvolit při experimentu jen určité parametry. Proto byl zvolen pouze jeden průměr nástroje a jemu odpovídající řezné podmínky, které se opíraly o doporučení výrobce. Rovněž byl zvolen pouze jeden druh materiálu na obou vzorcích z důvodu porovnání výsledků. A v neposlední řadě byl zvolen úhel naklonění nástroje $\beta_n = 15^\circ$. Při dlouhodobém zkoumání by stálo za zvážení provést větší počet úhlů použitých při 5osém obrábění.

Experiment byl proveden na CNC obráběcím centru Hermle C40 Dynamic. Použitý nástroj kulová fréza $\phi 6$ - U5286.300 byl vybrán dle nejčastějšího využívání ve firmě Ostroj a.s., kde se uskutečnilo frézování součástí. Byl vybrán materiál 1.2550 (Cr-W-Si), který se vyznačuje vysokou houževnatostí a odolností proti dynamickému namáhání. Předem byly stanoveny řezné podmínky při obrábění viz. tabulka 4.2. Efektivní průměr frézy bez naklonění nástroje se vypočte dle vztahu (4.2.1), v případě, že nástroj je tažený nebo tlačенý při změně polohy osy nástroje platí vztahy (4.2.2; 4.2.3).

$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (d - a_p)} = 2 \cdot \sqrt{0,2 \cdot (6 - 0,2)} = 2,15 \text{ mm} \quad (4.2.1)$$

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 \cdot a_p}{d} \right) + \beta_n \right] = 6 \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{6 - 2 \cdot 0,2}{6} \right) + 15 \right] = 3,53 \text{ mm} \quad (4.2.2)$$

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 \cdot a_p}{d} \right) - \beta_n \right] = 6 \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{6 - 2 \cdot 0,2}{6} \right) - 15 \right] = 0,63 \text{ mm} \quad (4.2.3)$$

Tabulka 4.2 Řezné podmínky pro všechny metody při experimentu

d_1 [mm]	v_c [m·min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	f_z [mm]	v_f [mm·min ⁻¹]	a_p [mm]	a_e [mm]
6	302	16000	0,0625	2000	0,2	0,2
Druh obrábění		d_{eff} [mm]		v_{Ceff} [m·min ⁻¹]		β_n [°]
3 – osé		2,15		108,07		0
5 – osé tažený nástroj		3,53		177,44		15
5 – osé tlačенý nástroj		0,63		31,67		15

5 Zhodnocení a rozbor dosažených výsledků

Tématem této kapitoly bude především porovnávání výsledků, nejprve pomocí CAD/CAM systému, porovnání zhotoveného modelu s obrobenou součástí a následně porovnání získaných údajů ze systému MasterCAM s výsledky dosaženými při měření vyrobených dílců na 3D souřadnicovém zařízení. Jedna z kapitol je dále věnována měření a vyhodnocování výsledků drsnosti povrchu. Rovněž byly popsány veškeré měřicí zařízení, které byly použity při vyhodnocování výsledků.

5.1 Porovnání obrobené součásti s modelem

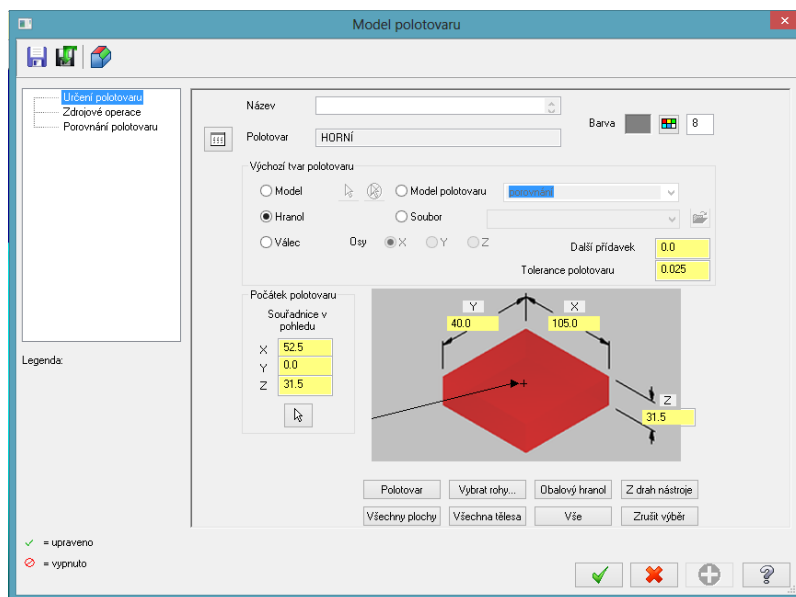
MasterCam je často označován za jeden z nejvíce používaných CAD/CAM softwarů na světě. Umožňuje modelování drátové geometrie řezného nástroje na plochách, jenž vede k preciznímu zpracování požadované úlohy a k získání dat pro vytvoření NC kódu.

Model polotovaru slouží k použití [22]:

- pro porovnání obrobené součásti s modelem,
- pro zbytkové obrábění,
- v simulátoru obrábění,
- pro ověření obrábění,
- pro export modelu do STL.

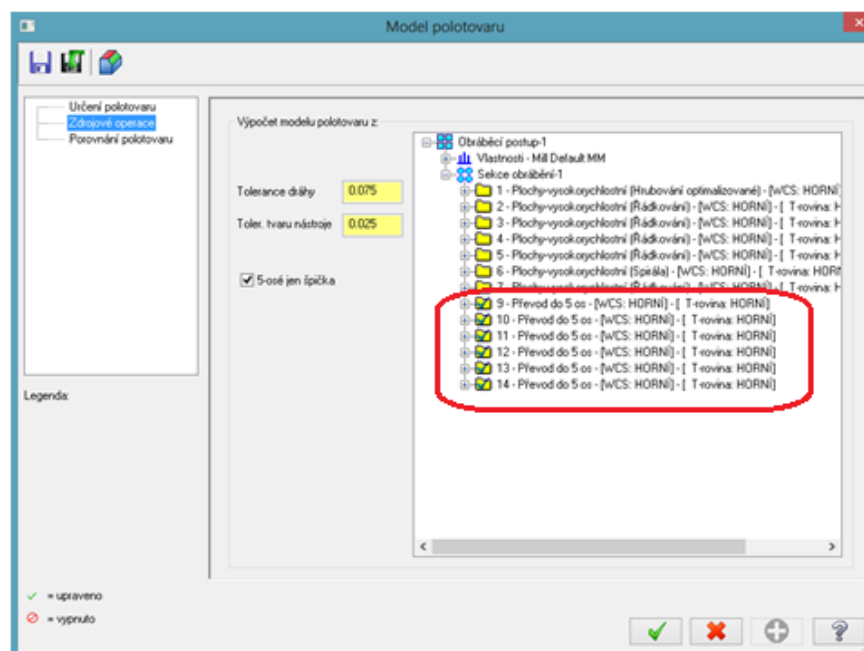
Postup pro porovnání obrobené součásti s modelem [22]:

A. Určení polotovaru - V programu byl vybrán připravený model a zadán počátek polotovaru pomocí souřadnic. Výchozím tvarem byl označen hranol.



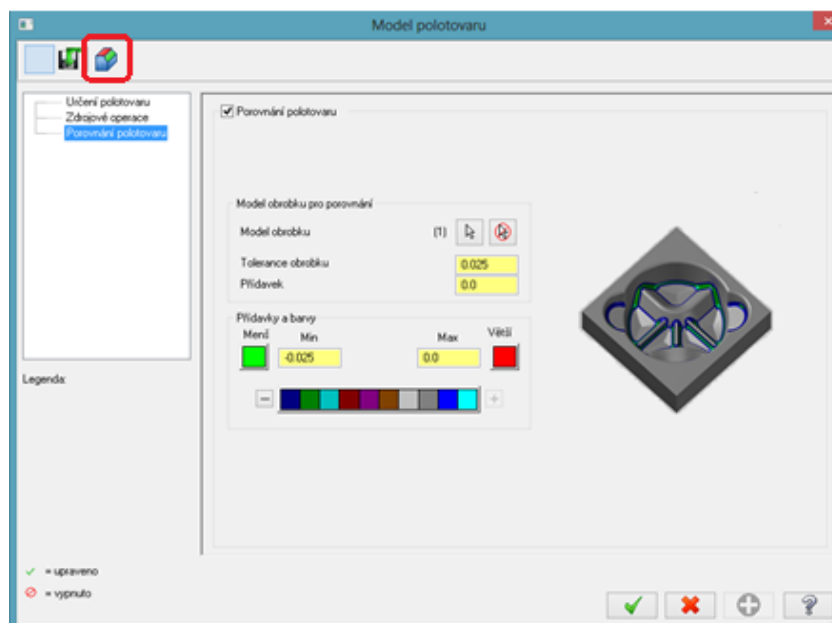
Obr. 5.1 Určení polotovaru při porovnávání s modelem

B. Zdrojové operace - Výběr operace či operací, jež jsou předmětem porovnání.



Obr. 5.2 Zdrojové operace při porovnávání s modelem

C. Porovnání polotovaru - Výběr modelu obrobku pro porovnání, nastavení tolerance obrobku na hodnotu 0,025 mm, velikost přídavku roven 0,0 mm, dále zvolení meze rozsahu odchylek (min., max.), jemnost rozlišení (počet barev) byl zvolen nejvyšší možný počet – na 10 intervalů.



Obr. 5.3 Porovnání polotovaru

D. Výsledky - Po přepočítání kliknutím na barevnou ikonu v levém horním rohu (viz.Obr. 5.3) získáme výsledné údaje. S dosaženými daty můžeme dále pracovat. Poskytuje možnost zobrazení kompletního dílce nebo pouze několika hodnot, např. hodnoty větší, menší či rozmezí min-max. Následně je také možné odebírat z výseče barev, a tak snižovat hodnotu zvoleného rozmezí. V krajních případech je možno vybrat pouze jednu barvu, jež následně zobrazuje určitou hodnotu přesnosti v daných místech obrábění. Pro přehlednější zobrazení byly zvoleny min. dvě barevná rozlišení. Při prvotní volbě rozmezí $(-0,1 \div 0,1)$ výsledné hodnoty na všech zkoumaných plochách byly vyobrazeny v zelené barvě, která zobrazuje podřezaný materiál. Červeně označené plochy, tedy zbytkové přídavky, byly pouze v místech mimo útvary. Tyto plochy nebyly předmětem zkoumání v rámci experimentu. Následným krokem bylo nastavení jemnějšího rozmezí hodnot.

Rozmezí $<-0,025; -0,00>$ - Zobrazení celého rozsahu na zkoumaném dílci.

Rozmezí $<-0,023; -0,018>$

Dle porovnání obrázků je patrné, že při 3osém obrábění došlo k většímu množství podřezání při strategii řádkování aplikované na jehlanu, avšak na ploše 5 (mezi útvary), bylo dosaženo lepších výsledků. Co se týče kulové plochy v případě 5osého obrábění došlo k většímu hromadění nerovností, avšak lepších výsledků bylo docíleno v oblasti pod vrcholem a těsně nad přechodovou hranicí.

Rozmezí $<-0,018; -0,013>$

Při druhém rozmezí je možno pozorovat velmi podobné výsledky jako v případě prvního rozmezí, kde se nachází větší množství odchylek při 3osém obrábění. Kulová část při 5osém obrábění je rovnoměrná, na rozdíl od plochy obrobené 3osým frézováním, kdy jsou jednotlivé vrstvy viditelně přerušeny.


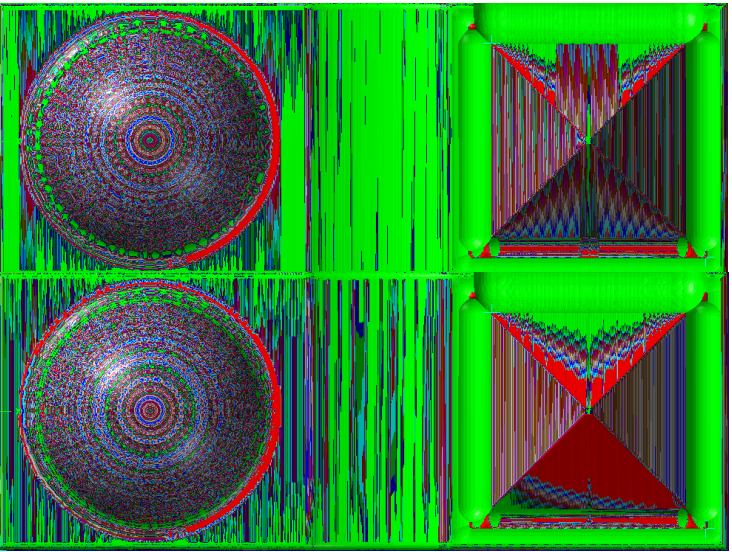

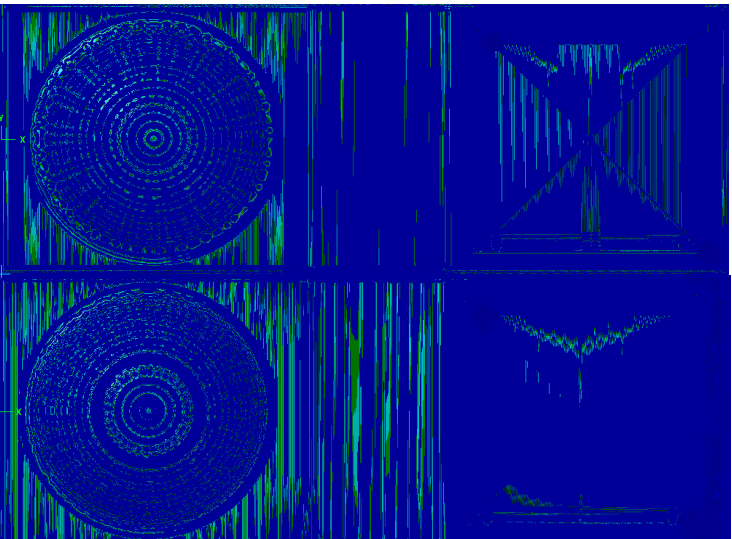

Rozmezí $<-0,013; -0,008>$


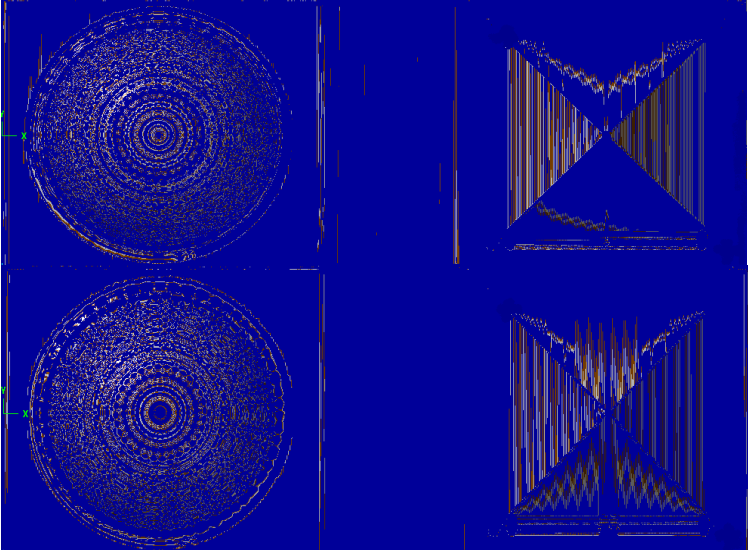

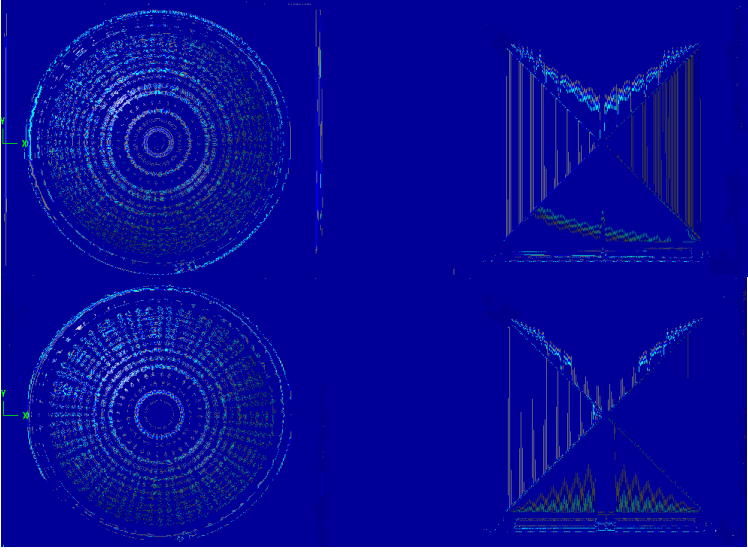
Při zkoumání jehlanu je možno pozorovat lepší výsledky při 5osém obrábění ve směru nástroje svislém, zatímco 3osé frézování zaznamenalo dobré výsledky ve směru vodorovném. Plochu č. 5 nelze v určeném rozmezí porovnávat.

Rozmezí $<-0,008; 0,0>$

V tomto případě můžeme konstatovat, že tažený nástroj (plocha č.1) při 5osém obrábění dosáhl příznivějších výsledků než nástroj při 3osém obrábění za stejných pracovních podmínek. Avšak při použití vodorovné strategie řádkování, kdy je nástroj tažený (plocha 2), bylo dosaženo lepších výsledků při 3osém obrábění.

Tabulka 5.1 Grafické zobrazení výsledků z MasterCamu

Rozmezí hodnot	Grafické zobrazení
<p>3osé</p> <p>-0,025 ÷ 0,0</p> 	
<p>5osé</p>	
<p>3osé</p>	
<p>-0,023 ÷ -0,018</p> 	
<p>5osé</p>	
<p>3osé</p>	
<p>-0,018 ÷ -0,013</p> 	
<p>5osé</p>	

Rozmezí hodnot	Grafické zobrazení
3osé -0,013 ÷ -0,008 	
3osé -0,008 ÷ 0,0 	

Tabulka 5.2 Zhodnocení grafických výsledů z MasteCamu

Hodnota rozmezí	Zhodnocení		
	Jehlan (číslo plochy)	Plocha mezi útvary (číslo plochy)	Kulový vrchlík (číslo plochy)
-0,023; -0,018	5osé (1;2;3;4)	3osé (5)	3osé (6)
-0,018; -0,013	5osé (1;2;3;4)	5osé (5)	5osé (6)
-0,013; -0,008	3osé (1;3) / 5osé (2;4)	5osé (5)	3osé (6)
-0,008; 0,0	3osé (1) / 5osé (2;3;4)	nelze hodnotit	5osé (6)

5.2 Měření drsnosti povrchu

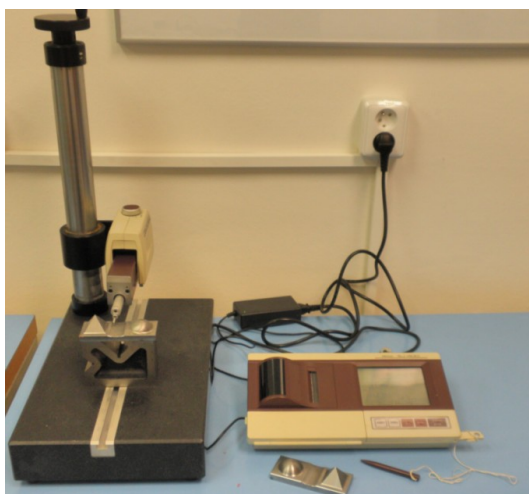
a.) Měřicí přístroj - Drsnoměr SJ-401

Byl použit dotykový neboli hrotový přístroj pro měření drsnosti povrchu od firmy Mitutoyo, který je koncipován dílenské prostředí. Drsnoměr SJ-401 nám umožňuje měřit vlnitost povrchu, strukturu povrchu a celou řadu dalších parametrů. Výčet hlavních výhod lze shrnout do následujících bodů: přesnost, spolehlivost, možnost přenosu přístroje a široký měřicí rozsah [23].

Během měření bylo použito několik druhů příslušenství, jež usnadňovaly a zpřesňovaly měření. Naměřené hodnoty byly ukládány do datové karty a poté, prostřednictvím speciální přípojky, byla data kopírována na přenosný disk. Držák se snímacím hrotem byl ustaven na vedení upevněném k mramorové desce. Pohyb klikou, ve směru hodinových ručiček nebo proti zaručoval kolmost měření v ose z. Rovněž bylo upotřebeno několik prizmat, které s pomocí plastelíny zaručovaly upevnění vzorků v průběhu měření drsnosti povrchu. Nastavení základní délky l_r a vyhodnocované délky l_n bylo stanoveno dle Tabulek 5.1. a 5.2.

Nastavené parametry při měření:

- měřicí síla snímače 0,75 mN,
- poloměr snímacího hrotu 2 μm ,
- základní délka $l_r = 0,8\text{mm}$,
- vyhodnocovaná délka $l_n = 4\text{ mm}$,
- Gaussův filtr,
- pojezdová rychlost 0,5 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 5.4 Měřicí zařízení drsnoměr SJ - 401

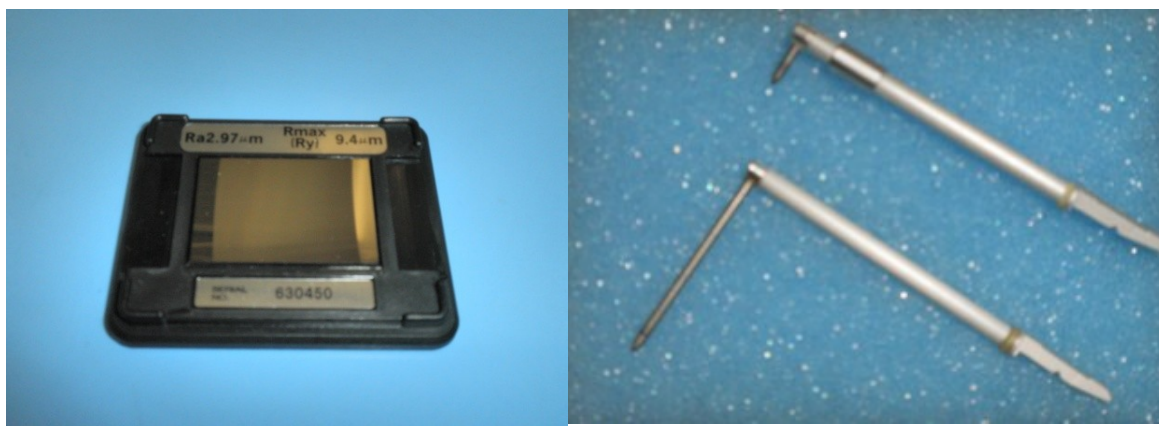
Tabulka 5.3 Základní délky drsnosti pro měření R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} a $R_{\Delta q}$ [24]

R_z	Základní délka drsnosti l_r	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n
$0,006 < R_a < 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a < 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a < 2$	0,8	4
$2 < R_a < 10$	2,5	12,5
$10 < R_a < 80$	8	40

Tabulka 5.4 Základní délky drsnosti pro měření R_z , R_p , R_v , R_t a R_c [24]

R_z	Základní délka drsnosti l_r	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n
$0,025 < R_z \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < R_z \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < R_z \leq 10$	0,8	4
$10 < R_z \leq 50$	2,5	12,5
$50 < R_z \leq 200$	8	40

Před samotným měřením provedeme kontrolu měřicího přístroje SJ-401. Kontrola naměřených hodnot se provádí pomocí kalibrační destičky, jež je dodávána s měřicím zařízením. Jedná se o přesně vyrobený vzorek se stanovenou hodnotou drsnosti (viz. obr.5.6). V určité fázi měření drsnosti na ploše 5 (viz. Obr. 4.2 Rozvržení ploch) bylo nutné provést výměnu standardního měřicího dotyku 12AAC731, protože rozměry tohoto dotyku nedovolovaly provést měření příčné drsnosti. Byl tedy použit měřicí dotyk pro hluboké drážky s označením 12AAC736 (viz. Obr. 5.6)



Obr. 5.5 Kalibrační destička (vlevo); porovnání snímacích dotyků (vpravo)

b.) Získané výsledky

Pro experiment byly použity dva hranoly stejného materiálu, jež byly obráběny stejnou technologií, avšak v případě prvního kusu nebylo použito naklonění nástroje.

V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty R_a , R_z získané z šesti měření. Abychom vyhověli požadavkům na dosažení R_a , R_z , bylo nutné provést podstatně vyšší počet měření jednotlivých ploch.

Existuje celá řada faktorů ovlivňujících drsnost povrchu. Mezi nejpodstatnější bychom mohli zařadit řezné podmínky při obrábění, především velikost posuvů, řezné prostředí, obráběný materiál, tvar a geometrie břitu, tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek [25].

V případě kopírovacího frézování kulovou frézou lze určit teoretickou drsnost frézovaného povrchu. Poloměr hrotu nástroje lze zaměnit za poloměr polokulové části kopírovací frézy R . Velikost drsnosti povrchu je specifikována ve směru posuvu dle velikostí posuvů na zub f_z a ve směru kolmém na posuv šířkou řezu a_e . Vzniklá podélná drsnost povrchu je dána dvěma způsoby. Teoreticky se jedná o kopírování drsnosti řezné hrany. Prakticky je tvořena třením hřbetu nástroje a obrobené plochy ve vzniklém nárůstku. Zatímco příčná drsnost povrchu je vytvořena kopírováním zaobleného řezného klínu na obrobený povrch se specifickou plastickou deformací a vzniklým opotřebením poloměru zaoblení nástroje [8].

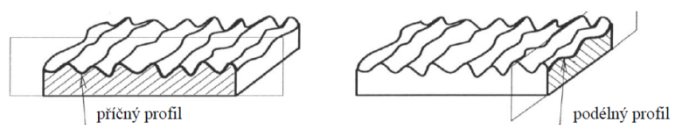
- Podélná drsnost

$$f_z = h \cdot \sqrt{\frac{d}{a_p}} = 0,05 \cdot \sqrt{\frac{6}{0,2}} = 0,2 \Rightarrow R_z = \frac{f_z^2}{8 \cdot R} = \frac{0,2^2}{8 \cdot 3} = 0,00167 \text{ mm} \quad (5.2.1)$$

- Příčná drsnost

$$R_z = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2 - a_e^2}{4}} = \frac{6}{2} - \sqrt{\frac{6^2 - 0,2^2}{4}} = 0,00167 \text{ mm} \Rightarrow 1,67 \mu\text{m} \quad (5.2.2)$$

$$R_a = \frac{R_z}{4} = \frac{1,67}{4} = 0,4 \mu\text{m} \quad (5.2.3)$$



Obr. 5.6 Zobrazen příčný profil (vlevo) a podélný profil (vpravo) drsnosti povrchu [8]

c.) Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou

Abychom získali správný a přesný výsledek, je nutné naměřené hodnoty zkontrolovat. Kontrola se provádí pomocí testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou, v tomto případě by tyto hodnoty nesměly být použity. Příčin vzniku hrubé chyby je několik mezi ty nejtypičtější patří nedodržení správného postupu měření, nesprávný odečet hodnoty či způsob zpracování, vada na měřidle, atd.

Postup kontroly odlehlé hodnoty [25]:

- Ze souhrnu získaných hodnot se vypočte střední hodnota a výběrová směrodatná odchylka.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.2.4)$$

kde: \bar{x} je střední hodnota,

n je rozsah výběru.

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2.5)$$

kde: $s(x)$ je výběrová směrodatná odchylka,

\bar{x} je střední hodnota,

x_i je naměřená hodnota,

n je rozsah výběru.

- Po posouzení rozsahu podezřelých hodnot souhrnu (x_2, x_n) se vypočtou hodnoty (H_2, H_n).

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad (5.2.6)$$

kde: H_2 je normovaná hodnota,

$s(x)$ je výběrová směrodatná odchylka,

\bar{x} je střední hodnota,

x_i je naměřená hodnota.

- Z tabulek k tomu určených se stanoví mezní hodnota H pro předem stanovenou pravděpodobnost p_a počet měření v souboru n . Pro počet měření 6 odpovídá $H = 1,67$.
- Za předpokladu, že $H_2 < H$ a $H_n < H$ hodnota x_2 není zatížená hrubou chybou, zůstává v souboru. Naopak hodnota x_n je ovlivněná chybou a ze souboru hodnot se musí vyřadit.

d.) Stanovení nejistoty měření

Podle mezinárodních norem se vyžaduje, aby výsledky měření byly uvedeny s nejistotou dané procedury. Nejistota měření je pojem, vyjadřující rozsah hodnot kolem výsledku měření. Může se jednat o samotný výsledek měření, ale také o hodnoty odečtené na použitých měřicích zařízeních. Základní charakteristikou je pravděpodobnostní princip, jenž vychází z předpokladu, že daná nejistota měření pokryje skutečnou hodnotu s předpokládanou pravděpodobností [25].

Proto byla vypočítána standardní nejistota typu A (u_A), B (u_B) a kombinovaná nejistota u_C a dále byla vypočtená rozšířená nejistota U_C . Standardní nejistota typu A je získána z opakovaných měření. Tato hodnota s počtem měření klesá. Zatímco standardní nejistota typu B není závislá na počtu měření a určuje se vytipováním možných zdrojů nejistot, nejčastěji dle dlouhodobé zkušenosti pracovníků. V této části jsou uvedeny vztahy pro výpočet nejistot [25]. Při Gaussově rozdělení odpovídá koeficient k_u hodnotě 2. Nejistota u_{B2} po konzultaci byla určena na $\pm 3\%$ naměřené hodnoty. Hodnota U_C je uváděna u naměřených údajů v tabulce 5.3.

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (5.2.6)$$

kde: u_A je standardní nejistota typu A,
 \bar{x} je střední hodnota,
 x_i je naměřená hodnota,
 n je rozsah výběru.

$$u_{B1} = \frac{z_{3\max}}{\sqrt{3}} \quad (5.2.7)$$

kde: $z_{3\max}$ je koeficient vlivu opěrné patky
 u_{B1} je nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu,

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad (5.2.8)$$

kde: u_B je standardní nejistota typu B,
 u_{B1} je nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu,
 u_{B2} jsou nejistoty měřicího přístroje

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5.2.9)$$

kde: u_A je standardní nejistota typu A,
 u_B je standardní nejistota typu B,
 u_C je kombinovaná standardní nejistota,

$$U_c = k_u \cdot u_c \quad (5.2.10)$$

kde: u_A je rozšířená kombinovaná nejistota,
 u_C kombinovaná standardní nejistota
 k_u je koeficient rozšíření

Tabulka 5.5 Výsledné hodnoty drsnosti Ra, Rz při 3osém obrábění

Číslo plochy	Parametr drsnosti Ra				Parametr drsnosti Rz			
	Teoretická drsnost Ra = 0,4 μm				Teoretická drsnost Rz = 1,67 μm			
	Podélný Směr	Rozdíl [%]	Příčný směr	Rozdíl [%]	Podélný směr	Rozdíl [%]	Příčný směr	Rozdíl [%]
1.	0,76 ± 0,07	81	0,59 ± 0,05	40	3,67 ± 0,28	120	3,65 ± 0,26	119
2.	1,21 ± 0,08	188	0,39 ± 0,07	-7	2,27 ± 0,19	36	6,25 ± 0,49	274
3.	0,79 ± 0,09	88	0,69 ± 0,05	64	4,17 ± 0,47	150	5,37 ± 0,43	222
4.	1,05 ± 0,08	150	0,46 ± 0,06	10	5,93 ± 0,53	255	2,52 ± 0,35	51
5.	0,40 ± 0,06	-5	1,70 ± 0,21	305	3,05 ± 0,79	83	8,38 ± 0,98	402
6.	0,29 ± 0,04	-31	0,40 ± 0,05	-5	1,48 ± 0,29	-11	2,03 ± 0,31	22

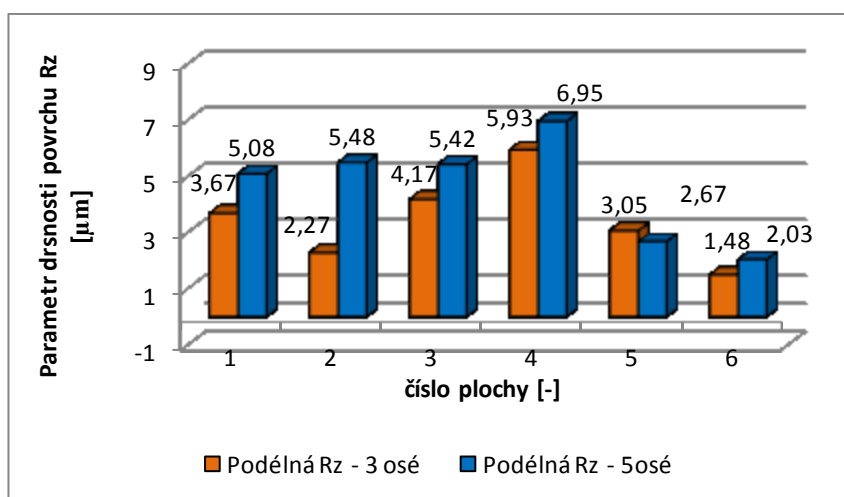
Tabulka 5.6 Výsledné hodnoty drsnosti Ra, Rz při 5osém obrábění

Číslo plochy	Parametr drsnosti Ra				Parametr drsnosti Rz			
	Teoretická drsnost Ra = 0,4 μm				Teoretická drsnost Rz = 1,67 μm			
	Podélný Směr	Rozdíl [%]	Příčný směr	Rozdíl [%]	Podélný směr	Rozdíl [%]	Příčný směr	Rozdíl [%]
1.	0,98 ± 0,08	133	0,50 ± 0,12	19	5,08 ± 0,41	204	3,30 ± 1,32	98
2.	0,94 ± 0,07	124	0,62 ± 0,06	48	5,48 ± 1,63	228	4,00 ± 0,50	140
3.	0,96 ± 0,09	114	0,58 ± 0,09	38	5,42 ± 0,39	225	3,90 ± 1,43	134
4.	1,24 ± 0,15	195	0,71 ± 0,10	69	6,95 ± 1,95	316	4,45 ± 0,45	166
5.	0,35 ± 0,06	-17	1,94 ± 0,15	362	2,67 ± 0,63	60	8,75 ± 2,06	424
6.	0,40 ± 0,07	-5	0,30 ± 0,06	-29	2,03 ± 0,29	22	1,92 ± 0,31	15

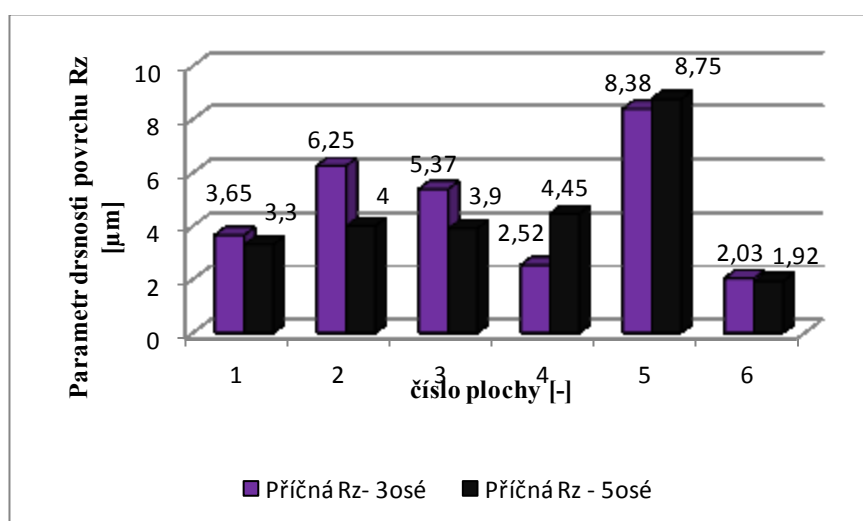
e.) Grafické zhodnocení

Tabulka 5.7 Rozvržení drah nástroje na měřených plochách

Číslo plochy	Tvar / Strategie
1	Jehlan/řádkování-zdola nahoru (tažený Nás.) – svislý pohyb
2	Jehlan/řádkování-zdola nahoru (tažený Nás.) – vodorovný pohyb
3	Jehlan/řádkování-shora dolů (tlačený Nás.) – svislý pohyb
4	Jehlan/řádkování-shora dolů (tlačený Nás.) – vodorovný pohyb
5	Plocha mezi útvary/ řádkování
6	Kulový vrchlík/spirálová



Obr. 5.7 Grafické zobrazení výsledků Rz – podélné drsnosti



Obr. 5.8 Grafické zobrazení výsledků Rz – příčné drsnosti

5.3 Měření přesnosti povrchu

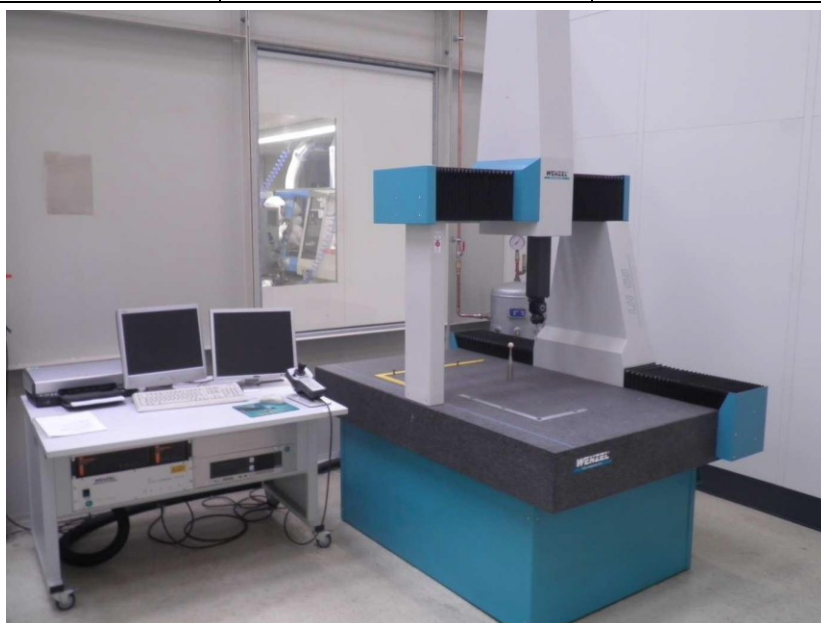
3D měřicí centrum WENZEL LH 65

Toto měřicí centrum slouží především pro zajištění kvality a rozměrové přesnosti výroby např. vstřikovacích forem, pro zhotovení elektrod a výrobu plastových výlisků. Rovněž je potřeba při měření odchylek od konstrukčních CAD modelů, včetně s případnou možností skenování tvarových ploch s tvorbou CAD modelů [13].

Základní deska, pinola i portál jsou zhotoveny z černého granitu. Tento materiál byl vybrán z důvodu nízké tepelné roztažnosti, což umožňuje tepelnou setrvačnost, které je velmi potřebná v případě přesného měření. Hmotnost pinoly je vyvažována pomocí pneumatického válce. Pro části pojezdových drah jsou použita vzduchová ložiska zaručující co nejnížší možné opotřebení. Vysoce přesně opracována a ručně lapována dráha pro osu Y, jež je spojena s granitovou základní deskou, zajišťuje kvalitní a dlouhotrvající stabilitu pro měření. Důležité části portálu a pojezdu osy Y jsou chráněny před okolními vlivy prostředí pomocí vlnovce. Je vybaveno CNC řízením ve všech osách a vyznačuje se celistvým designem. Dostupnost jednotlivých částí umožňuje snadnou a rychlou údržbu zařízení [13].

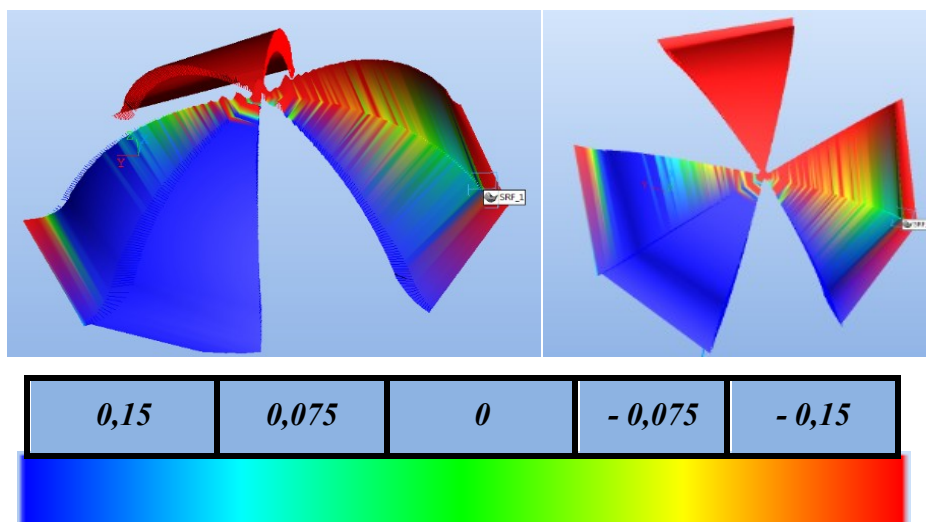
Tabulka 5.8 Měřicí rozsah přístroje [13]

Osa X	Osa Y	Osa Z
600	750/1200	500



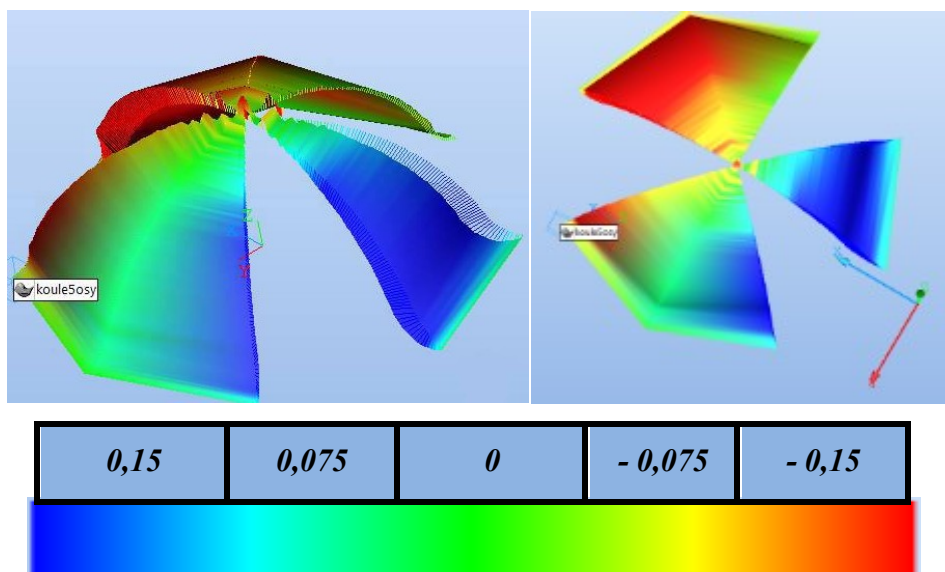
Obr. 5.9 Ukázka 3D měřicího centra WENZEL LH 65 [26]

A.) Získané hodnoty z 3osého frézování – bez naklonění nástroje



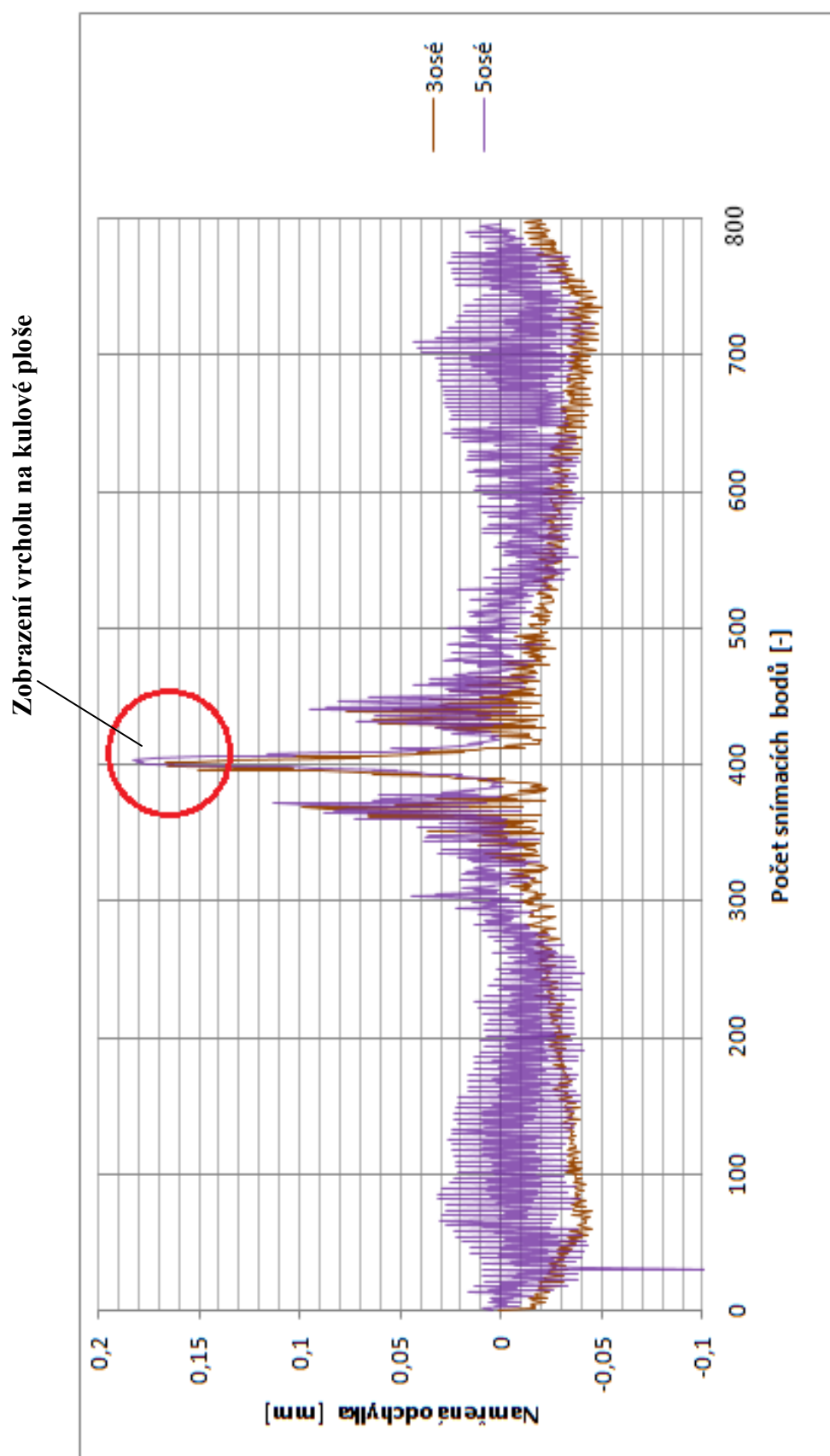
Obr. 5.10 Naměřené hodnoty bez naklonění nástroje

B.) Získané hodnoty z 5osého frézování – s nakloněním nástroje $\beta_n = 15^\circ$

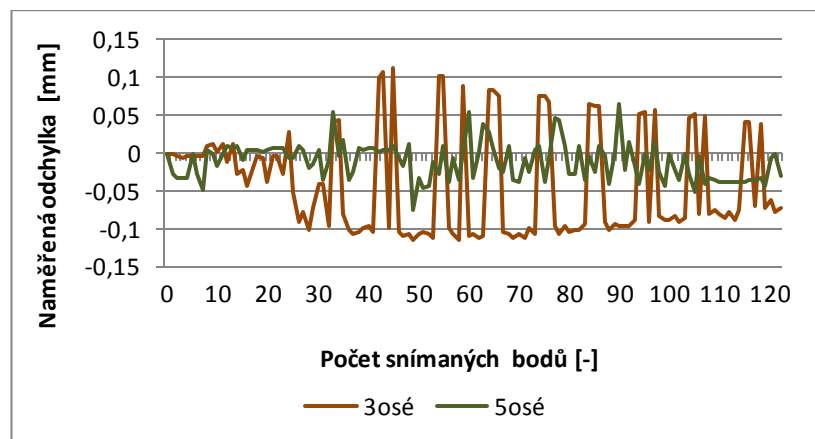


Obr. 5.11 Naměřené hodnoty s nakloněním nástroje $\beta_n = 15^\circ$

Na měřenou plochu koule byly nastaveny čtyři řezy, na nichž bylo naprogramováno 200 bodů, (tzn. 4x200 bodů). Po přejetí snímacího dotyku bylo možné vygenerovat grafické zobrazení. Toto zobrazení barevně znázorňuje výskyt odchylek, které vznikly při procesu obrábění na experimentálních vzorcích. Při vygenerování protokolu bylo možné sestavit křivky zobrazující tyto nerovnosti. Z výsledků je zřejmé, že v případě 3osého frézování došlo k výraznějšímu podřezání součásti. V obou případech na vrcholu koule došlo během frézování k výraznějším nerovnostem, což potvrzuje graf zobrazující odchylky (viz. obr. 5.13)

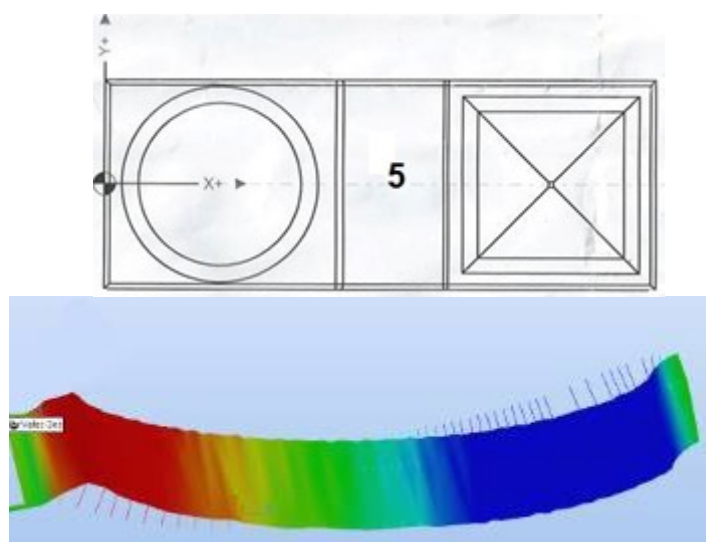


Obr. 5.12 Graf zobrazující naměřené odchylky na kouli

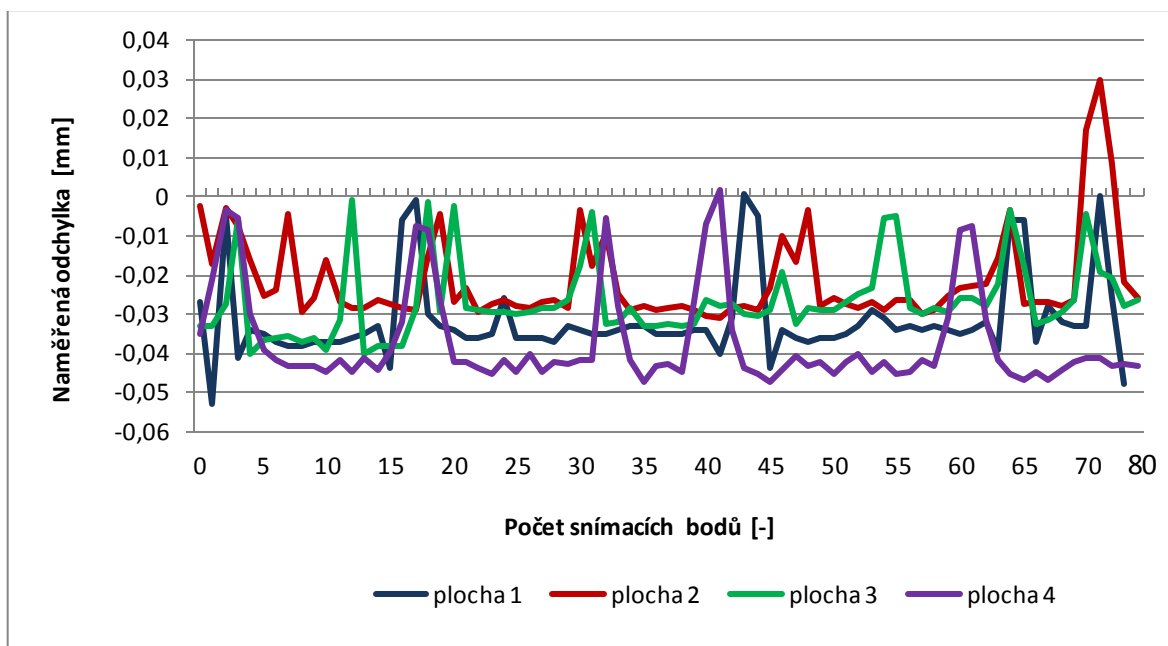


Obr. 5.13 Graf zobrazující hodnoty odchylek plocha 5 – mezi útvary

Také u plochy č.5 (plocha mezi útvary) bylo provedeno srovnání 3osého a 5osého frézování. V případě této plochy bylo nastaveno 120 snímacích bodů. Výsledky naměřených hodnot plochy č. 5 (mezi útvary) jsou lepší ve prospěch 5osého frézování. Kromě počátečního frézování, kdy byly odchylky o něco vyšší, než v případě 3osého obrábění. Při 3osém frézování největší rozdíl odchylek nastal v poloze nástroje, kdy dosahoval nejmenší hodnoty d_{eff} a z toho vyplývá, že řezná rychlost v_{ceff} byla na nejnižší hodnotě.



Obr. 5.14 Grafická ukázka snímaného povrchu plochy č.5 (mezi útvary)



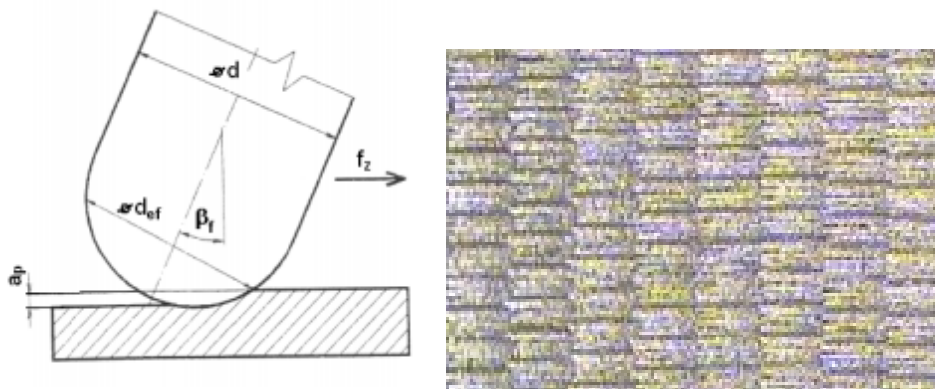
Obr. 5.12 Graf zobrazující hodnoty odchylek na jehlanu – 3osé frézování

V případě jehlanu každá plocha byla snímána 80 body. Dle naměřených odchylek 3osého frézování můžeme stanovit, že příznivějších výsledků u Jehlanu bylo dosaženo u plochy č. 2 (frézování vodorovně, tažený nástroj) v porovnání s plochou č. 4 (frézování vodorovně, tlačný nástroj). Nejnižších hodnot naměřených odchylek bylo zaznamenáno u plochy č. 3 (frézování svislé – tlačný nástroj).

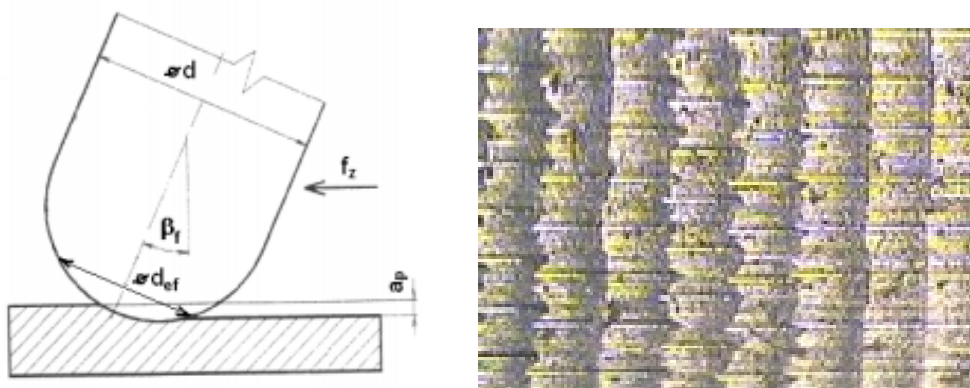
5.4 Srovnání Tažený - Tlačený nástroj při frézování

Polohování osy nástroje vůči obrobku lze provést třemi způsoby. Jedná se o případy, kdy je nástroj tlačený či tažený nebo je možná kombinace těchto poloh. Výhody taženého nástroje při naklonění kulové frézy jsou tišší chod a byla pozorována i dosažená lepší kvalita výsledného povrchu. Na rozdíl od tlačeného nástroje, kdy tyto výhody nebyly zaznamenány [8].

Vzorky použité při experimentu byly vloženy pod mikroskop umožňující čtyřnásobné zvětšení. I při tomto nízkém zvětšení můžeme pozorovat rozdíly plynoucí z pohybu nástroje. Na prvním obrázku byla provedena strategie řádkování ve směru zdola – nahoru. Zatímco druhý obrázek znázorňuje stejný typ strategie, avšak směr ze shora – dolů. Dosažená kvalita obrobeného povrchu je v případě plochy č.1.



Obr. 5.13 Schéma taženého nástroje [27]; Plocha při zvětšení 4x



Obr. 5. 17 Schéma tlačeného nástroje [27]; Plocha při zvětšení 4x

6 Závěr

Tento experiment byl uskutečněn na soustavě obráběcího centra HERMLE C 40 Dynamic, nástroji kulové fréze $\varnothing 6$ - U5286.300 od firmy Fraisa a byl použit materiál 1.2550 (Cr-W-Si). Řezné podmínky byly zvoleny s ohledem doporučení výrobce nástroje. Volba úhlu naklonění nástroje byla zvolena 15° , se záměrem porovnání výsledků drsnosti a přesnosti povrchu při naklonění nástroje ($\beta_n = 15^\circ$) a bez naklonění nástroje ($\beta_n = 0^\circ$).

Volba strategií při experimentu byla vybrána především z důvodu porovnání řádkování ať už svislého či vodorovného v případě, kdy je nástroj tzv. tažený, tlačенý. A spirálová plocha sloužila k porovnání výsledků při 3osém či 5osém obrábění.

Výsledky drsnosti povrchu nejsou zcela jednoznačné. V případě příčné drsnosti parametru R_z vyšly ve prospěch 5osého obrábění. Zatímco naměřené hodnoty podélné drsnosti parametru R_z byly menší u 3osého frézování. Jednoznačně nevyhovující strategií v případě 5osého obrábění Jehlanu (plocha 4) byla strategie vodorovná (cik-cak) při pohybu nástroje shora-dolů (tlačенý). Nejmenší naměřená drsnost byla na kulovém vrchlíku (plocha 6). Pro dosažení přijatelnějších výsledků by byla potřeba změna řezných podmínek při frézování.

V rámci experimentu se očekávalo dosažení menších odchylek v případě 5osého frézování, tento úsudek se dle výsledků získaných z 3D měřicího zařízení potvrdil. S ohledem na přesnost, lepších výsledků bylo dosaženo s použitím 5osého frézování (viz. obr. 5.12.) na ploše kulového vrchlíku, kdy byly naměřeny menší odchylky nerovností od nuly. Došlo k menšímu podřezání součásti, než při 3osém frézování. Výrazných nerovností bylo dosaženo pouze v oblasti vrcholu kulového vrchlíku. Pro tuto část by bylo potřeba provést změny řezných podmínek, nebo změna úhlu β_n . Avšak většina hodnot nepřekročila hranici 0,05 mm, z čehož můžeme považovat výsledky za přijatelné.

Výsledky drsnosti povrchu a zkoumání drah nástroje na mikroskopu (viz. obr. 5.16; obr. 5.17) vyšly ve prospěch tzv. taženého nástroje. V případě frézování tvarových ploch by se tento způsob měl upřednostňovat.

Kvalita a přesnost povrchu jsou jevy, jež výrazně ovlivňují funkčnost, spolehlivost, životnost strojírenské součásti, proto je nutné věnovat zvýšenou pozornost tomuto tématu. Avšak existuje mnoho faktorů, které se podílejí na konečném výrobku. Proto je někdy nezbytné opakovaně provádět zkoušky a upravovat potřebné parametry. Tento způsob je ovšem velmi ekonomicky a časově náročný.

7 Seznam použité literatury

- [1] OSTROJ a.s. [online]. [2012] [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.ostroj.cz/hydraulika>
- [2] POČÍTAČOVÁ PODPORA PROCESU OBRÁBĚNÍ. Projekty.fš.vsb [online]. 2012[cit.2014-04-07]. Dostupné z: http://projekty.fš.vsb.cz/459/ucebniopory/Pocitacova_podpora_procesu%20_obrabe_ni.pdf
- [3] CAM: 3osé frézování. AXIOM TECH [online]. 2012 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.axiomtech.cz/24819-nx-cam-3-ose-frezovani>
- [4] MecSoft Corporation RhinoCAM. Začínáme s RhinoCAMem, uživatelská příručka. 150 s, 2005.
- [5] STRATEGIE VYSOKO RYCHLOSTNÍHO HRUBOVÁNÍ: Konturové hrubování. SolidCAM [online]. 2014 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/cam-solutions/hsrhm-3d-high-speed-milling/hsr-roughing/>
- [6] SOLIDCAM[online]. 2009 [cit. 2014-04-07]. HSM obráběcí strategie Dostupné z <http://www.solidcam.cz/article.asp?nDepartmentID=7&nArticleID=92&nLanguageID=1>>
- [7] SADÍLEK, M. Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému. – disertační práce. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.
- [8] SADÍLEK, Marek. VÝZKUM ZMĚNY POLOHY OSY NÁSTROJE PŘI VÍCEOSÉM FRÉZOVÁNÍ. Ostrava, 2012. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [9] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. Nové směry v progresivním obrábění. E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů. 2007. Ostrava : Ediční středisko VŠB-TUO, 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf
- [10] DRSNOST POVRCHU. Hommel [online]. 2013 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [11] CAD systémy a hodnocení strategií obrábění. CAD: CAD/CAM obrábění [online]. 2013 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2385-cam-systemy-a-hodnoceni-strategii-obrabeni.html>
- [12] KROUPA, M. Porovnání přesnosti digitalizované tvarové plochy s původní plochou modelu. Diplomová práce, Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2005, 149s., 5 s. příloh, vedoucí práce: Jiří Česánek.
- [13] WENZEL - Serie LH: WENZEL LH 65. BRT servis: Home [online]. 2008 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.brtservis.cz/cs/wenzel.html>
- [14] SCHULZ, H.: HOCK, St. High-speed milling of dies and moulds-cutting conditions and technology, Annaalsof the CIRP 44 (1), 1995, pp. 35-38.
- [15] HERMLE C40 U Dynamic. Hermle: Obráběcí centra [online]. 2014 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: <http://www.hermle.de/>

- [16] Technologie: CNC frézování. KOVODěčín: cnc obrábění - nástrojárna [online]. 2008[cit.2014-04-07].Dostupnéyz:
<http://www.kovodecin.cz/cz.php?txt=technologie&detail=6>
- [17] CENTRA PRO VYSOKORYCHLOSTNÍ OBRÁBĚNÍ. MMspektrum: Průmyslové spektrum [online]. 2002 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/centra-pro-vysokorychlostni-obrabeni.html>
- [18] BALL NOSE AND MILLS. Fraisa: E-shop [online]. 2014 [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: http://webshop.fraisa.ch/pdf/5286_E.pdf
- [19] OCEL NÁSTROJOVÁ: pro práce za studena. JKZ: Bučovice a.s. [online]. 2010 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://jkz.cz/node/155>
- [20] OBRÁBĚCÍ STROJE A TECHNOLOGIE: frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-form-a-zapusťek.html>
- [21] INVENTOR CAM. ComputerAgency [online]. 2013 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.c-agency.cz/get.php?id=6138>
- [22] SADÍLEK, Marek. Práce s modely polotovaru a porovnání obrobeného dílce s modelem. Ostrava, 2013.
- [23] MITUTOYO. SURFTEST SJ-401: Přístroj pro měření drsnosti povrchu. Teplice, 2008.
- [24] ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu: Postup pro periodický profil drsnosti. Ostrava: Český normalizační institut, 1999. Dostupné z: <http://seznamesn.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=55360>
- [25] TICHÁ Š. Strojírenská metrologie, část 1. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2004. 104 s.ISBN 80-248-0672-X
- [26] Wenzel LH 65. EXA PRO: Market placeforusedmachines [online]. 2004, 2014 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.exapro.com/wenzel-lh-65-p30923041/>
- [27] SADÍLEK, M.; ČEP R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. Odborná konference - Frézování IV. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2007, s. 13 – 18. ISBN 80-214-3239-X.

8 Seznam obrázků a tabulek

OBR. 2.1 OBECNÁ TVAROVÁ PLOCHA.....	6
OBR. 2.2 STRATEGIE HRUBOVÁNÍ Z PRŮŘEZŮ LINEÁRNÍ (VLEVO,) KAPSOVÁNÍ (VPRAVO)	9
OBR. 2.3 STRATEGIE ODVRTÁVÁNÍ – ZAPICHOVÁNÍ OSOU NÁSTROJE [4].....	9
OBR. 2.4 KONTUROVÉ HRUBOVÁNÍ [6]	10
OBR. 2.5 STRATEGIE ZBYTKOVÉHO HRUBOVÁNÍ [6].....	10
OBR. 2.6 DOKONČOVACÍ STRATEGIE Z PRŮŘEZŮ [6].....	11
OBR. 2.7 DOKONČOVACÍ STRATEGIE PAPERKOVÁ [6].....	11
OBR. 2.8 STRATEGIE VODOROVNÉ OBLASTI [6].....	12
OBR. 2.9 DOKONČOVACÍ STRATEGIE MEZI KŘIVKAMI [6].....	12
OBR. 2.10 VÝŠKOVÉ PARAMETRY PROFILU [10]	16
OBR. 2.11 UKÁZKA PRŮMĚRNÉ KVADRATICKÉ ÚCHYLKY PROFILU R _q [10].....	17
OBR. 2.12 ZOBRAZENÍ DÉLKOVÝCH PARAMETRŮ [10]	17
OBR. 2.13 ANALÝZA POVRCHU PO STRATEGII (VLEVO), UKÁZKA PŘI FRÉZOVÁNÍ (VPRAVO).....	18
OBR. 2.14 MODEL SOUČÁSTI (VLEVO); VÝSLEDKY DISTANČNÍ ANALÝZY (VPRAVO)[12].....	19
OBR. 2.15 UKÁZKA TVAROVÉ PLOCHY [13].....	19
OBR. 3.1 DÍLENSKÝ NÁČRT EXPERIMENTÁLNÍHO VZORKU	20
OBR. 3.2 OBRÁBĚCÍ CENTRUM HERMLE C40 U DYNAMIC [16]	21
OBR. 3.3 UKÁZKA KOLÉBKY S OTOČNÝM STOLEM[16]	22
OBR. 3.4 ROZMĚROVÉ PARAMETRY KULOVÉ FRÉZY [18]	23
OBR. 4.1 UKÁZKA STRATEGIE ŘÁDKOVÁNÍ NA EXPERIMENTÁLNÍM VZORKU	25
OBR. 4.2 ROZVRŽENÍ PLOCH NA JEDNOTLIVÝCH ÚTVARECH	26
OBR. 4.3 STRATEGIE SVISLÉ ŘÁDKOVÁNÍ ZESPODU.....	28
OBR. 4.4 STRATEGIE VODOROVNÉ ŘÁDKOVÁNÍ ZESPODU	28
OBR. 4.5 STRATEGIE SVISLÉ ŘÁDKOVÁNÍ SHORA	29
OBR. 4.6 STRATEGIE VODOROVNÉ (CIK-CAK) ŘÁDKOVÁNÍ SHORA	29
OBR. 4.7 NÁZORNÉ ZOBRAZENÍ POHYBU PŘI SPIRÁLOVÉ STRATEGII [6]	30
OBR. 4.8 UKÁZKA SPIRÁLOVÉ STRATEGIE NA EXPERIMENTÁLNÍM VZORKU	30
OBR. 5.1 URČENÍ POLOTOVARU PŘI POROVNÁVÁNÍ S MODELEM	32
OBR. 5.2 ZDROJOVÉ OPERACE PŘI POROVNÁVÁNÍ S MODELEM.....	33
OBR. 5.3 POROVNÁNÍ POLOTOVARU.....	33
OBR. 5.4 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ DRSNOMĚR SJ - 401.....	37
OBR. 5.5 KALIBRAČNÍ DESTIČKA (VLEVO); POROVNÁNÍ SNÍMACÍCH DOTYKŮ (VPRAVO)	38
OBR. 5.6 ZOBRAZENÍ PŘÍČNÝ (VLEVO) A PODÉLNÝ PROFIL (VPRAVO) DRSNOSTI POVRCHU	39

OBR. 5.7 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ RZ – PODÉLNÉ DRSNOSTI	43
OBR. 5.8 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ RZ – PŘÍČNÉ DRSNOSTI	43
OBR. 5.9 UKÁZKA 3D MĚŘÍČÍHO CENTRA WENZEL LH 65 [26].....	44
OBR. 5.10 NAMĚŘENÉ HODNOTY BEZ NAKLONĚNÍ NÁSTROJE	45
OBR. 5.11 NAMĚŘENÉ HODNOTY S NAKLONĚNÍM NÁSTROJE $B_N=15^\circ$	45
OBR. 5.12 GRAF ZOBRAZUJÍCÍ NAMĚŘENÉ HODNOTY NA KOULI.....	46
OBR. 5.13 GRAF ZOBRAZUJÍCÍ HODNOTY ODCHYLEK PLOCHA 5 – MEZI ÚTVARY	47
OBR. 5.14 GRAFICKÁ UKÁZKA SNÍMANÉHO POVRCHU PLOCHY Č.5 (MEZI ÚTVARY).....	47
OBR. 5.15 GRAF ZOBRAZUJÍCÍ HODNOTY ODCHYLEK NA JEHLANU – 3OSÉ FRÉZOVÁNÍ	48
OBR. 5.16 SCHÉMA TAŽENÉHO NÁSTROJE [27]; PLOCHA PŘI ZVĚTŠENÍ 4X.....	49
OBR. 5.17 SCHÉMA TLAČENÉHO NÁSTROJE [27]; PLOCHA PŘI ZVĚTŠENÍ 4X.....	49
TABULKA 2.1 PŘEHLED VÍCEOSÍCH STRATEGIÍ	13
TABULKA 3.1 TECHNICKÉ PARAMETRY STROJE [15]:.....	22
TABULKA 3.2 ROZMĚROVÉ PARAMETRY NÁSTROJE [18]:.....	23
TABULKA 3.3 VÝROBCEM DOPORUČENÉ ŘEZNÉ PODMÍNKY NÁSTROJE [18]:.....	23
TABULKA 3.4 TECHNICKÉ PARAMETRY NÁSTROJE [18]:	23
TABULKA 3.5 CHEMICKÉ SLOŽENÍ MATERIÁLU [19]:	24
TABULKA 3.6 TECHNOLOGICKÉ ÚDAJE PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELI [19]:.....	24
TABULKA 3.7 MECHANICKÉ VLASTNOSTI A POPOUŠTĚCÍ TEPLoty V ZÁVISLOSTI NA TVRDOSTI [19]:... 24	24
TABULKA 4.1 POHYBY FRÉZY PO JEDNOTLIVÝCH PLOCHÁCH.....	27
TABULKA 4.2 ŘEZNÉ PODMÍNKY PRO VŠECHNY METODY PŘI EXPERIMENTU	31
TABULKA 5.1 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ Z MASTERCAMU.....	35
TABULKA 5.2 ZHODNOCENÍ GRAFICKÝCH VÝSLEDŮ Z MASTERCAMU.....	36
TABULKA 5.3 ZÁKLADNÍ DÉLKY DRSNOSTI PRO MĚŘENÍ R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} A $R_{\Delta Q}$ [24].....	38
TABULKA 5.4 ZÁKLADNÍ DÉLKY DRSNOSTI PRO MĚŘENÍ R_z , R_p , R_v , R_t A R_c [24]	38
TABULKA 5.5 VÝSLEDNÉ HODNOTY DRSNOSTI R_a , R_z PŘI 3OSÉM OBRÁBĚNÍ	42
TABULKA 5.6 VÝSLEDNÉ HODNOTY DRSNOSTI R_a , R_z PŘI 5OSÉM OBRÁBĚNÍ.....	42
TABULKA 5.7 ROZVRŽENÍ DRAH NÁSTROJE NA MĚŘENÝCH PLOCHÁCH.....	43
TABULKA 5.8 MĚŘÍČÍ ROZSAH PŘÍSTROJE[13]	44

9 Seznam příloh

Příloha A – Výkres experimentálního vzorku – 01

Příloha B – Tabulka Hodnoty drsnosti R_q , R_t , R_p , R_v a R_{sk} pro 3-osé podélné, příčné

Příloha C – Tabulka Hodnoty drsnosti R_q , R_t , R_p , R_v a R_{sk} pro 5-osé podélné, příčné

Příloha D – Graf zobrazující rozdíl parametrů drsnosti R_z

Příloha E – NC kód – v elektronické podobě, soubor tvarové plochy *3ose.nc*

Příloha F – NC kód – v elektronické podobě, soubor tvarové plochy *5ose.nc*

Poděkování

Závěrem bych chtěl poděkovat firmě Ostroj a.s. za možnost zpracování mé diplomové práce. Poděkovat bych chtěl především technologovi panu Jaroslavu Huškovi za pomoc a odborné rady v dané problematice a taktéž poděkování patří vedoucímu Technické přípravy výroby, panu. Ing. Tomáši Roškotovi. A v neposlední řadě bych chtěl také poděkovat panu doc. Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D. za odborné rady a cenné připomínky při tvorbě moji diplomové práce.